

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Diagnostika vřeten obráběcích strojů

Diagnostics of Machine Tool Spindles



Student:

Bc. Dalibor Osmančík

Vedoucí Diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student:	Bc. Dalibor Osmančík
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace:	72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma:	Diagnostika vřeten obráběcích strojů Diagnostics of Machine Tool Spindles

Zásady pro vypracování:

Technická diagnostika obráběcích strojů je vzhledem ke specifickým vlastnostem těchto zařízení velmi problematická a náročná. Mezi tyto specifické odlišnosti lze považovat např. vysoké otáčky, velké nároky na přesnost a nízké vibrace. V rámci této diplomové práce se zabývejte touto problematikou, proberte možnosti a úskalí aplikace diagnostiky na tyto zařízení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proved'te potřebná měření.
5. Proved'te konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce nebo firma SKF Ložiska, a.s.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. 159 s. ISBN 80-03-00308-3.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry

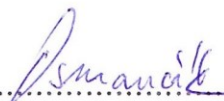


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou Diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2014

..... 

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mojí diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užití (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu užití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5.2014



.....

podpis

Dalibor Osmančík

Bernartice č. 73

790 57

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

OSMANČÍK, D. *Diagnostika vřeten obráběcích strojů: diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 59 s. Vedoucí práce: Blata, J.

Diplomová práce se zabývá návrhem vhodné metody technické diagnostiky pro vřeteno víceosého obráběcího centra. V úvodu je rozebrána problematika vřeten obráběcích strojů. V další části jsou popsány možnosti technické diagnostiky aplikovatelné pro kontrolování provozního stavu vřeten. Z možných metod diagnostiky je pro kontrolování vřetene zvoleno měření mechanického chvění tzv. vibrodiagnostika. Potom následuje provedení návrhu vibrodiagnostiky pro konkrétní vřeteno se dvěma způsoby sběru dat – pochůzkové měření off-line a on-line monitorování. V poslední části jsou zobrazeny výsledky měření s porovnáním jednotlivých metod sběru dat, ze kterých vyplývá, že nejvhodnější metodou pro sledování stavu vřetene by mělo být on-line monitorování vibrací.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

OSMANČÍK, D. *Diagnostics of Machine Tool Spindles.: Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2014, 59 p. Thesis head: Blata, J.

This thesis describes the design of appropriate methods of technical diagnostics for multi-axis machining center spindle. In the introduction the problems of machine tool spindles. The next section describes the options for technical diagnostics applicable for controlling the operating state of spindles. Of the possible methods of diagnostics is selected for controlling the spindle measurement of mechanical vibrations called vibrodiagnostics. Then follows the implementation of the proposal Vibrodiagnostics specific spindle with two ways of collecting data - route measurements off-line and on-line monitoring. In the last part shows the results of measurements by comparing individual data collection methods, which shows that the most appropriate method for monitoring the status of the spindle should be on-line vibration monitoring.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Vřetena obráběcích strojů	10
2.1	Přesnost chodu	10
2.2	Tuhost	11
2.3	Konce vřeten	12
2.4	Vřetenová ložiska	12
2.5	Pohony vřeten	15
2.6	Další komponenty vřeten	17
3	Diagnostika vřeten	18
3.1	Údržba strojů.....	18
3.2	Možnosti diagnostiky vřeten.....	20
3.3	Prostředky SKF k provádění vibrodiagnostiky.....	30
4	Návrh diagnostiky pro kontrolované vřeteno.....	33
4.1	Popis měřeného stroje.....	33
4.2	Aplikace vibrodiagnostiky.....	38
5	Měření vřetene	40
5.1	Použitý měřicí přístroj pro off-line měření	40
5.2	Použité měřicí zařízení pro on-line měření	42
5.3	Analýza naměřených dat.....	44
5.4	Zhodnocení možností použití vibrační diagnostiky	55
6	Závěr	56
7	Seznam použité literatury.....	58
8	Seznam příloh.....	60

Seznam použitého značení

CNC počítačově řízené obráběcí stroje

ISO mezinárodní norma

ČSN česká státní norma

HSK systém upnutí nástroje ve vřetení

ABMA klasifikace toleranční třídy

SKF švédská továrna na výrobu ložisek

HSC vysokorychlostní obrábění

RPM otáčky za minutu

BPFI závada na vnitřním kroužku

BPFO závada na vnějším kroužku

BSF závada na ložiskových tělískách

MIMOSA konvence pro označování míst měření vibrací

Značka	Veličina	Jednotka
i	počet valivých elementů	1
f_o	otáčková frekvence	Hz
B_d	průměr valivého elementu	mm
P_d	střední průměr	mm
φ	kontaktní úhel	°
v_c	efektivní hodnota rychlosti kmitání	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
s_c	efektivní hodnota výchylky kmitání	μm

1 Úvod

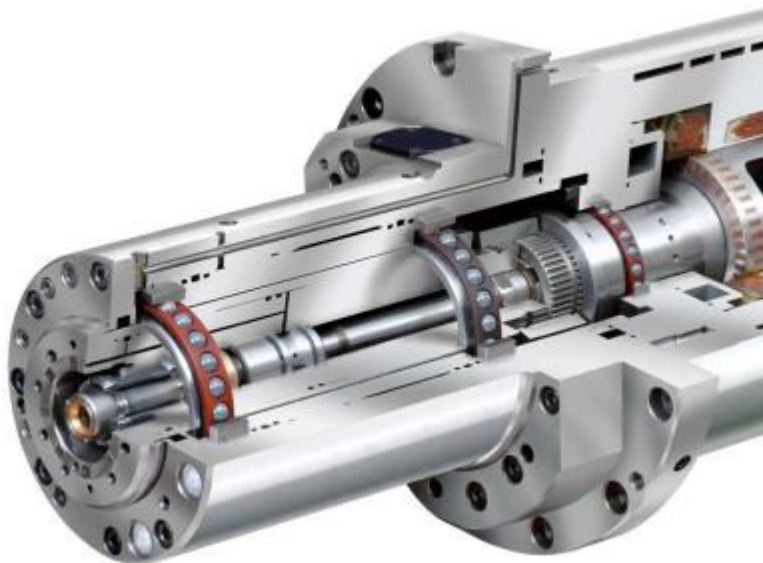
Vřeteno je jednou z nejdůležitějších součástí obráběcího stroje a jeho stav zásadně ovlivňuje kvalitativně i kvantitativně možnosti obrábění. Vřeteno je značně namáháno vlivem zatížení a teploty, protože zprostředkovává styk mezi obráběnou součástí a řezným nástrojem. Vlivem vysokého zatížení dochází k namáhání ložisek a to může v některých případech dospět k jejich poškození a tak selhání i vřetene. V současné době jsou kladeny vysoké nároky na efektivnost výroby a jakékoli neplánované odstavení stroje může znamenat vysoké finanční ztráty. Důsledkem toho je snaha provádět sledování strojů za účelem zjistit včas zhoršení jejich stavu a tak s předstihem naplánovat odstavení stroje, zajistit náhradní díly a případně objednat externí firmu na provedení opravy. Abychom měli korektní informace o skutečném stavu tohoto vřetene, je potřeba provádět určitým způsobem jeho kontrolu, ke které slouží některé metody technické diagnostiky.

Cílem diplomové práce je zhodnotit možnosti použití technické diagnostiky a to především vibrační diagnostiky pro sledování stavu vřetene víceosého obráběcího centra, které provádí pracovní operace při obrábění převodovek ve firmě Hyundai Motor Manufacturing s.r.o. v Nošovicích. Pro zhodnocení možností vibrační diagnostiky na vřetenu byly zvoleny dva způsoby sběru dat, off-line pochůzkou a on-line monitorováním. Snahou je včas detekovat špatný stav vřetene, který by měl negativní vliv jednak na kvalitu výroby, ale taky na její plynulost z důvodu nečekaného selhání a vznikutí tak nechtěného neplánovaného prostoje.

2 Vřetena obráběcích strojů

Úlohou vřetena je zaručit obrobku (u soustruhů) nebo nástroji (u frézky, vrtačky, brusky) přesný otáčivý pohyb, což znamená, že odchylky bodů obrobků či nástroje se pohybují v určité přípustné toleranci.

Při hodnocení vřeten sledujeme několik vlastností, které mají vliv na použitelnost vřetene pro různé aplikace a jsou dále popsány.



Obrázek 1: Řez vřetenem [20]

2.1 Přesnost chodu

Přesnost chodu se kontroluje na předním konci vřetena. Je určena velikostí házení v radiálním a axiálním směru.

Radiální házení je určeno:

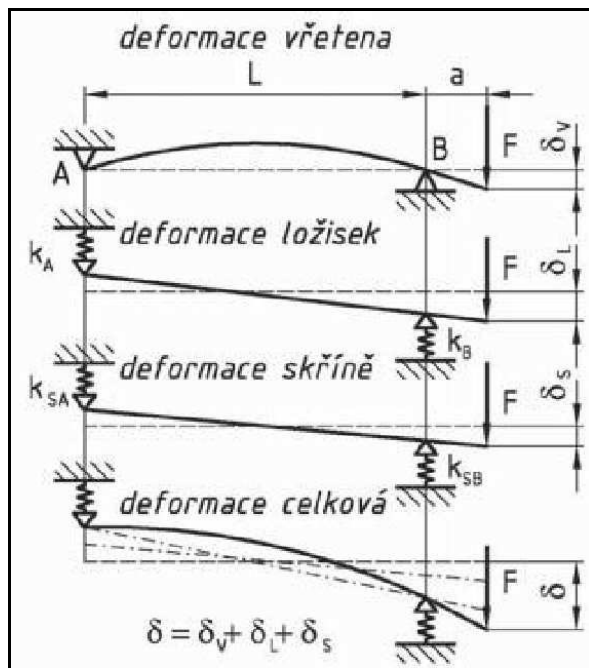
- Nepřesností otáčení vřetena během jedné otáčky
- Nesouosostí plochy, na které se měří a osy otáčení
- Úchylkou kruhovitosti plochy, na které se měří házení

Axiální házení je určeno:

- Axiálním házením ložisek
- Nekolmostí čelní plochy vřetena k ose jeho otáčení

2.2 Tuhost

Tuhost vřetena má zásadní vliv na přesnost obrábění a také na dynamickou stabilitu os. Zpravidla se hodnotí na předním konci, kde se upevňuje upínací zařízení s obrobkem nebo nástrojem, protože deformace vznikající v tomto místě má přímý vliv na jakost práce.



Obrázek 2: Deformace vřetena – vliv tuhosti vřetena, ložisek a skříně [13]

2.3 Konce vřeten

Konce vřeten jsou normalizované a slouží k přesnému upnutí součástí nebo nástrojů do vřetena. Konec vřetene tvoří přesný kuželový otvor, který má osu v rámci tolerance totožnou s osou rotace.

Upínací kužel může být:

- ISO (SK)
- HSK
- Coromant Capto

2.4 Vřetenová ložiska

Úkolem vřetenových ložisek je uložení vřetene ve vřeteníku tak, aby byly zachytávány síly působící na vřeteník v radiálním i axiálním směru. U CNC strojů jsou vřetena ukládána z 99 % do valivých ložisek a zbylé 1 % odpovídá ukládání do rotačních hydrostatických ložisek.



Obrázek 3: Obrázek x: Rozložené součásti ložiska [20]

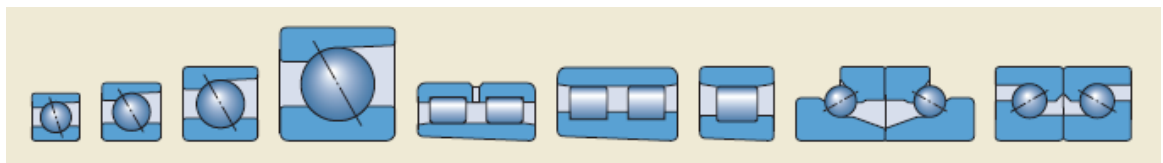
Na vřetenová ložiska jsou kladeny následující požadavky:

- Přesnost
- Vysoká tuhost
- Malé pasivní odpory
- Malé opotřebení
- Možnost vymezování vůle
- Jednoduchá údržba a spolehlivost
- Klidný chod

Ložiska ve vřetenech mohou být uspořádána mnoha způsoby. Základní rozdělení je provedeno do 4 skupin podle předního ložiska:

- uložení s dvouřadým válečkovým ložiskem
- uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem
- uložení v kuželíkových ložiskách
- uložení vřeten s průvlekovým motorem (elektrovřeteno)

Ložiska mohou být vyrobena celá z ocele nebo již hojně používaná tzv. hybridní ložiska, která mají keramické valivé elementy z Si_3N_4 . Hybridní ložiska mají nižší koeficient tření, jsou lehčí a tvrdší. Dále mají malou tepelnou vodivost a vysokou odolnost proti korozi.



Obrázek 4: Ložiska používána ve vřetenech [19]

Třída přesnosti ložiska

Přesnost chodu ložiska má zásadní vliv na přesnost chodu vřetene. Přesnosti ložisek se dělí do několika tolerančních tříd dle různých norem, jako je ABMA, ISO a SKF. Tříde přesnosti musí také odpovídat tolerance souvisejících dílů, aby byla zajištěna požadovaná přesnost chodu celého vřetene.

Tabulka 1: Porovnání standardů přesnosti [19]

ABMA	ISO	SKF
ABEC 9	2	PA9A
ABEC 7	4	P4
ABEC 5	5	P5

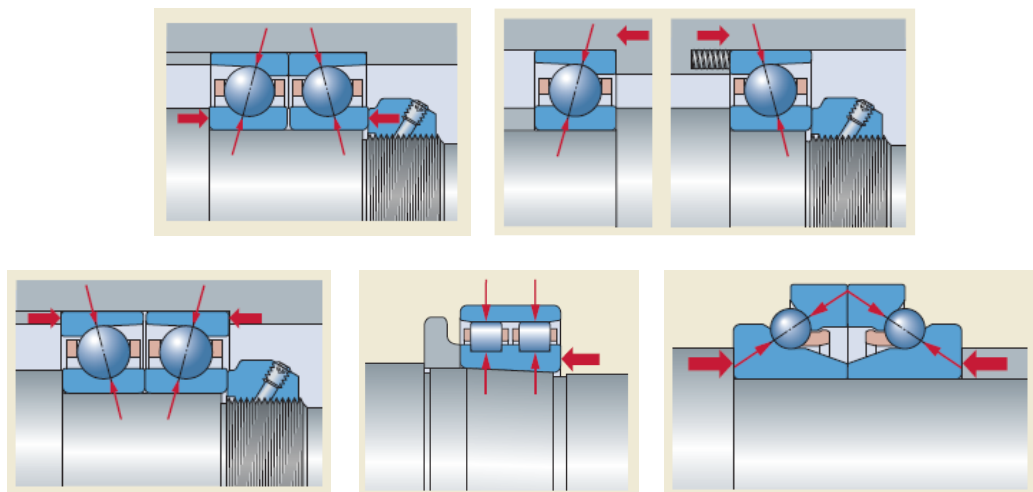
Tabulka 2: Přesnosti pro vysokopřesnostní ložiska [19]

SKF Toleranční třída	ISO, ABMA Hlavní rozměry	ISO, ABMA Přesnost chodu
SP	ISO 5, ABEC 5	ISO 4, ABEC 7
UP	ISO 4, ABEC 7	ISO 2, ABEC 9
P4A	ISO 4, ABEC 7	ISO 2, ABEC 9
P4C	ISO 4, ABEC 7	ISO 4, ABEC 7
PA9A	ISO 2, ABEC 9	ISO 2, ABEC 9

Uložení ložiska a předpětí

U vřetenových ložisek se využívá možnosti předepnutí ložisek, což znamená vymezení vůle na nulu a tím zvýšení pracovní přesnosti a tuhosti vřetene. Možnosti nastavení vnitřní vůle jsou provedeny nasunováním ložiska na kuželový čep (válečková ložiska), nebo nastavením vůle mezi vnějšími či vnitřními kroužky (ložiska s kosoúhlým stykem). Ložiska s kosoúhlým stykem se ukládají v páru a mohou být vůči sobě tzv. do "O", do "X" nebo do

“T” (obrázek). Dodávat se mohou sady pro konkrétní uspořádání nebo jako univerzálně párovatelná ložiska. Zvolený druh uložení a předepnutí ovlivňuje hodnotu maximálních otáček.



Obrázek 5: Způsoby vymezení vnitřní vůle [19]

2.5 Pohony vřeten

Pohon vřetene může být řešen několika způsoby, od čehož se odvíjí celá konstrukce, možnosti použití ložisek, způsoby zástavby, možnosti údržby a výměny vřeten v případě poruchy. Rozdělení náhonů je následující:

- Vložený převod
 - řemenem
 - ozubenými koly
 - převodovkou
- Přímý náhon
 - spojení elektrovřetena nebo servopohonu s vřetenem
- Elektrovřeteno
 - synchronní
 - asynchronní

Vřetena poháněná řemenem

K přenosu výkonu mohou být použity klínové nebo ozubené (synchronní) řemeny. Tam, kde je potřeba zajistit přesnou polohu mezi vřetenem a motorem, se používají ozubené řemeny. Tento způsob pohonu je používán jak u strojů s vysokými otáčkami a malým krouticím momentem, tak u strojů s nízkými otáčkami a vysokým krouticím momentem. Jeho výhodou je dobré tlumení vibrací vzniklých při obrábění a také nepřenáší vibrace od motoru. Nevýhodou je ovšem velké zatížení ložisek vlivem napínání řemene, velký zástavbový prostor a údržba řemenového pohonu (dopínání a výměna).

Vřetena s náhonem ozubenými koly

Výhodou tohoto pohonu je možnost práce při nízkých otáčkách a vysokém krouticím momentu, dále je méně náročný na údržbu. Nevýhodou pohonu je generování hluku, vibrací a vyšší teploty než jiné pohony, které se přenáší na ostatní části vřetene a ovlivňují tak přesnost výroby. Tento převod také špatně tlumí vibrace přenášené od obráběcího nástroje.

Vřetena s přímým náhonem

Tyto vřetena jsou napřímo spojena s motorem pomocí spojky a není u nich možnost měnit převodový poměr vůči motoru. Používají se pro vysoké otáčky a to především pro HSC obrábění. Výhody pohonu jsou jednoduchá výměna motoru, snadná údržba a méně náročné chlazení oproti elektrovřetenu z důvodu odděleného motoru od vřetene

Vřetena s integrovaným pohonem (elektrovřetena)

U těchto pohonů je motor integrován do vřetena tak, že hřídel vřetena slouží jako rotor a v tubusu vřetene je vsazen stator. Používané motory jsou asynchronní nebo vektorově řízené synchronní motory. Výhodou pohonu je nízké generování vibrací a možnost práce při vysokých otáčkách. Nevýhodou elektrovřeten je velké zahřívání motoru a proto je potřeba vřeteno intenzivně chladit, aby nedocházelo přenosu tepla na ostatní součásti a vřetene a neovlivňovala se tak negativně přesnost obrábění.

2.6 Další komponenty vřeten

Brzdění vřetene

Z důvodu časté výměny obráběcích nástrojů jsou vřetena vybavena brzdou, díky které dochází k úspoře času při rychlém zastavení. Často používané jsou kotoučové brzdy pro jejich jednoduchost, klidný průběh brzdění a minimální točivý moment v odbrzděném stavu. U moderních CNC strojů jsou k brzdění používány frekvenční měniče, které proudově brzdí motor.

Aretace vřetene

U CNC obráběcích strojů při výměně nástroje je potřeba vřeteno zastavit v určité poloze, aby výřezy nástroje přesně zapadly do unášecích kamenů. K zajištění této činnosti slouží kotouč opatřený zářezem, který je součástí vřetene a do něhož zapadá čep nebo kladka. U moderních CNC strojů se sleduje poloha vřetene pomocí encoderu.

Snímání otáčení vřetene

Snímání otáčení vřetene je zapotřebí z důvodu výroby závitů, aby bylo zajištěno správné řízení velikosti posuvu v závislosti na otočení vřetene. K tomuto se využívá snímačů několika typů. Principem je převedení otáčivého pohybu na elektrický signál a to nejčastěji pomocí optického nebo magnetického snímače.

Pro tvorbu kapitoly 2 jsem čerpal z literatury [13], [14], [19]

3 Diagnostika vřeten

3.1 Údržba strojů

Základní úlohou údržby je zajištění spolehlivosti a provozu schopnosti svěřených strojů. To znamená, že je snaha provozovat stroj bez poruchy po celou dobu jeho stanovené životnosti nebo i déle a tím dosáhnout:

- vysoké produktivity výroby
- vysoké kvality výroby
- zamezení neplánovaných odstávek
- úspora financí za opravy a náhradní díly
- nízké energetické náročnosti

Typy údržby

V průběhu technického rozvoje se vyvinulo několik typů údržby, které se aplikovaly s ohledem na zařazení stroje z pohledu důležitosti, složitosti a bezpečnosti. Výběr systému údržby ovlivňuje také výše finančních nákladů vynaložených na jednotlivé typy údržby.

Rozdělení strategie údržby:

- Reaktivní (po poruše)
- Preventivní (plánovaná)
- Prediktivní (dle skutečného stavu)
- Proaktivní (s odstraněním příčin poškození)
- TPM (totálně produktivní údržba)

Při zajišťování prediktivní a proaktivní údržby je potřeba mít informace o aktuálním stavu stroje zjišťovaném pomocí metod technické diagnostiky, které se provádí následujícím procesem:

1. Zjištění počátečního stavu
2. Monitorování
3. Detekce
4. Analýza
5. Doporučení

Proces údržby...

Možnosti údržby vřeten poskytované společností SKF

Společnost SKF se již více než 100 let zabývá výrobou ložisek a postupem času rozšířila svůj zájem do všech oblastí, které souvisí celkovou problematikou pohonů. Proto není překvapením, že SKF využilo mnohaletých zkušeností a znalostí pro vypracování efektivního konceptu pro údržbu různorodých zařízení, mezi které patří i vřetena obráběcích strojů.

V oblasti vřeten obráběcích strojů poskytuje následující služby:

- Výrobu vřeten
- Opravy vřeten
- Diagnostiku vřeten
- Školení a poradenství
- Nasazení kompletního systému údržby pro konkrétní zařízení

Opravy vřeten

SKF provádí opravy vřeten mnoha značek a k tomuto využívá informace z centrální databáze, kde získává data od tisíců vřeten. Do nedávna bylo středisko pro opravy a repase vřeten v rakouském Steyeru, ke kterému přibýlo znalostní centrum v Katovicích, kde se rovněž začaly provádět opravy vřeten.

Proces opravy se skládá z mnoha bodů, z nichž některé jsou:

- rozmontování vřetene a důkladná kontrola s přeměřením všech součástí
- kontrola systému chlazení a mazání
- kontrola snímačů
- kontrola elektrických částí
- kontrola uložení ložisek, vůle vřetene, házení a vyvážení
- záběh vřetene a kontrola vibrací
- případné zakonzervování pro pozdější použití
- vypracování protokolu

Z výše popsaných bodů je zřejmé, že oprava vřeten je velice specializovaná činnost vyžadující speciální vybavení a odborníky s patřičnými znalostmi a zkušenostmi.

3.2 Možnosti diagnostiky vřeten

V této kapitole budou rozebrány možnosti provozní bezdemontážní diagnostiky, díky které se získávají informace o provozním stavu bez nutnosti odstavovat sledovaný stroj mimo provoz. Současný trend je maximálně využívat možnosti strojů a dosahovat co nejdelší životnosti s vysokou spolehlivostí a tím dosahovat snižování nákladů na údržbu. Snahou je postupný přechod od preventivní údržby k prediktivní, kde by nedocházelo ke zbytečným výdajům za výměnu dílů, které ještě nedosáhly konce své životnosti, nebo naopak dílů které předčasně selhaly a tím poškozovaly další související díly stroje. Těchto cílů je možné dosáhnout vhodnou implementací metod technické diagnostiky.

Diagnostikou vřeten se zjišťuje stav uložení ložisek, která mají zásadní vliv na přesnost chodu a tím na přesnost obrábění.

Technickou diagnostiku je možné provádět různými metodami, které se v zásadě dělí dle sledované fyzikální veličiny na níže uvedené:

- Vibrodiagnostika
- Tribodiagnostika

- Termodiagnostika
- Akustická diagnostika
- Elektrodiagnostika

Pro efektivní plánování údržby je důležité zvolit pro konkrétní stroj vhodné sledovací metody, správně určit intervaly měření, ale také provádět takové vyhodnocení naměřených dat, které poskytne vypovídající informace o stavu stroje. V dalším textu budou rozebrány jednotlivé metody technické diagnostiky.

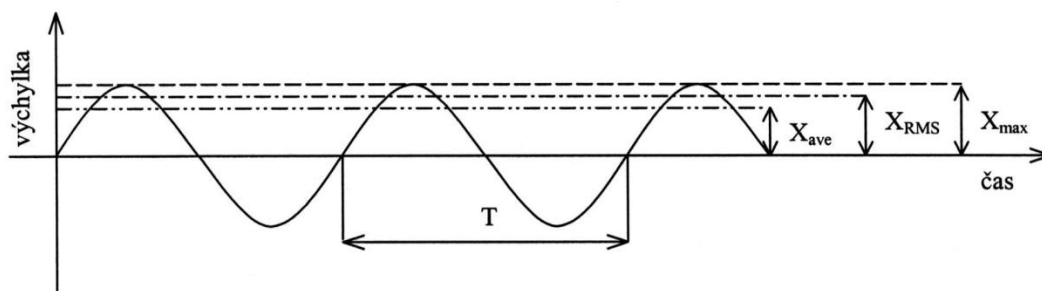
Vibrodiagnostika

Všechny rotační stroje při svém chodu generují vibrace. Sledováním a vyhodnocováním těchto vibrací je možné získávat informace o technickém stavu sledovaných strojů. Vibrační diagnostika se provádí pomocí různých metod v závislosti na typu stroje, jeho důležitosti, možnosti měření, měřicího vybavení, ale také v neposlední řadě možnosti kvalifikace pracovníka provádějícího měření. Prováděním vibrační diagnostiky je možné odhalit vznikající závady již v raném stádiu a díky tomu včasně reagovat na tento stav. Proto je vysoká šance odstranit závadu dříve, než nastane poškození stroje nebo vznik neplánované odstávky, která v některých případech je velmi nežádoucí.

Základní příčiny vzniku vibrací jsou následující:

- Nevyváženost
- Nesouosost
- Uvolnění v konstrukci
- Rezonance konstrukce
- Poškození ložisek
- Nevhodná konstrukce

Základní vztahy



Obrázek 6: Znázornění harmonické kmitání [-]

Okamžitá výchylka

$$x = X_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad [\text{mm}]$$

Rychlost

$$v = \frac{dx}{dt} = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Zrychlení

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = A_{\max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}]$$

Snímače vibrací

Významný vliv na získávání informací o chvění stroje má správný výběr snímače vibrací. Snímače vibrací mají za úkol převádět mechanické chvění na elektrickou veličinu, kterou je možné zesílit a zpracovávat v měřicím přístroji. Různé druhy snímačů se mezi sebou liší rozsahem frekvence, rezonančními vlastnostmi, dynamickým rozsahem, přesností, hmotností, citlivostí a cenou. Základní rozdělení snímačů je následující:

- Seismické snímače
- Snímače relativní výchylky

Další rozdělení snímačů je podle měřené veličiny:

- Snímače výchylky – sonda přiblížení na principu vířivých proudů
- Snímače rychlosti (valometry) – indukce napětí vodiče pohybujícího se v magnetickém poli
- Snímače zrychlení (akcelerometry)
 - Piezoelektrické – generují elektrický náboj
 - Piezorezistivní – mění elektrický odpor
 - Akcelerometry s proměnnou kapacitou (iMEMs)

Kritéria hodnocení dle ČSN ISO 10816

Norma ČSN ISO 10816 poskytuje informace o hodnocení strojů na základě měření celkové efektivní rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10 až 1000 Hz. Pro hodnocení se používá mohutnost vibrací, což je nejvyšší hodnota z měření na různých místech stroje. Hodnocení strojů se provádí podle dvou kritérií:

- I. Kritérium – hodnocení velikosti vibrací
- II. Kritérium – hodnocení změny velikosti vibrací

Kritérium I.: Velikost vibrací

Hodnocení je založeno na rozdělení do čtyř pásem, která jsou oddělena mezními hodnotami mohutnosti vibrací. Zařazení do těchto pásem se provádí na základě typu stroje a naměřených vibrací. Pásma se dělí následovně:

Pásmo A – zařazení do tohoto pásma většinou odpovídá vibracím nově přejímaných strojů.

Pásmo B – stroje, které mají vibrace v tomto pásmu, mohou být zpravidla provozovány po neomezené dlouhou dobu.

Pásmo C – stroje, které mají vibrace v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý a trvalý provoz. Mohou být provozovány do doby nápravy.

Pásmo D – stroje s vibracemi v tomto pásmu jsou považovány za nebezpečné a mohou způsobit poškození stroje.

Na základě informací o zařazení stroje do některého z pásem lze učinit rozhodnutí ohledně dalšího provozu stroje, jako je okamžité odstavení, naplánování možné opravy apod. Hranice pásem jsou doporučené na základě dlouhodobých zkušeností. Výrobci zařízení si mohou dle vlastních zkušeností upravit hodnoty pro meze jinak, než je uvedeno v normě.

Dle dodatku ČSN ISO 10816-1/Amd.1 jsou hranice pásem následující:

- hranice pásem A/B je v rozsahu 0,71 až 4,5 mm/s
- hranice pásem B/C je v rozsahu 1,8 až 9,3 mm/s
- hranice pásem C/D je v rozsahu 4,5 až 14,7 mm/s

Dodatkem normy jsou hranice pásem určeny dosti široce a určování pro jaké stroje která hranice patří, není zcela jasné.

Kritérium II.: Změna vibrací

Hodnocení spočívá v tom, že se sleduje změna velikosti vibrací od předem stanovené referenční hodnoty, která se naměří při ustálených podmínkách na stroji v dobrém provozním stavu. Jde zejména o naměřené hodnoty nového stroje nebo stroje, který je po opravě. Tato metoda hodnocení vibrací se používá proto, že někdy mohou nastat významné změny v chování stroje, u kterých vibrace nedosáhnou hranic pásem pro podmíněný provoz a tak by zdánlivě nebylo potřeba konat žádné nápravné opatření.

Pro hodnocení stroje dle tohoto kritéria je potřeba stroj pravidelně sledovat, aby bylo možno v průběhu času pozorovat, jak se hodnoty vibrací mění a tím včas detekovat vznik závady. Pokud se při tomto pravidelném sledování nazývaném monitorování zjistí odchylka od normálního stavu zvaného referenční hodnota, dojde k tzv. detekování závady. Dalším krokem je provedení analýzy problému, to znamená provést diagnostiku pro odhalení příčiny odchylky a vzniku závady.

Pravidelným monitorováním je vhodné tvořit trendy, které mohou graficky znázornit, jak se vibrace měnili v průběhu času. Tyto grafické trendy mohou znázorňovat několik stavů:

A – setrvale dobrý stav, bez závady

B – náhlá změna

C – typický trend

D – nesmyslný trend

Provozní meze vibrací

Pro usnadnění sledování strojů se stanovují provozní poplachové meze vibrací, na které je třeba reagovat. Tyto poplachové meze mají dva stupně:

Výstraha – je to nastavená hodnota, při které dochází k významné změně ve stavu stroje, u které je potřeba provést nápravné opatření. Do provedení nápravy stroj může dále pracovat. Pro stanovení meze výstrahy se doporučuje k referenční hodnotě přičíst 0,25x hodnoty hranice pásem B/C.

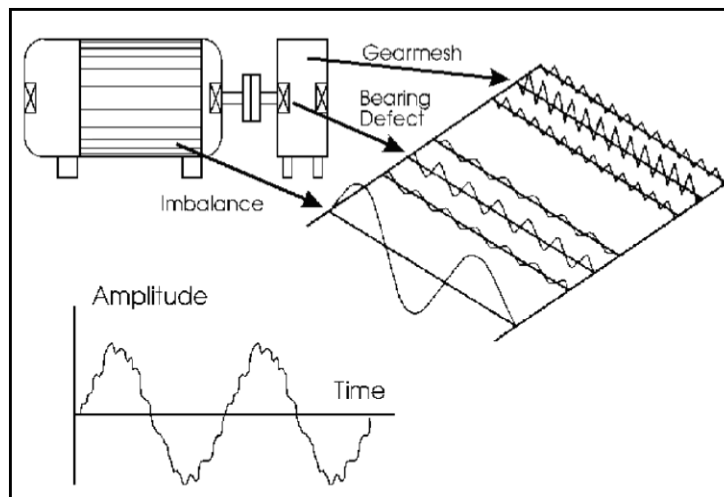
Prerušení provozu – je to nastavená hodnota, při které může dojít k poškození stroje, proto se stroj při dosažení této hodnoty musí ihned vypnout a okamžitě je potřeba provést nápravné opatření.

Směrnice pro nastavení alarmu pro měření obálky signálu zrychlení (SKF)

Tato směrnice vytvořená společností SKF slouží pro nastavení poplachů při měření obálky zrychlení ložisek. Tyto směrnice vznikly na základě statistického hodnocení existujících databází. Postup spočívá v tom, že na základě průměru vývrtu ložiska a otáček hřídele se z grafu odečte hodnota pro poplachovou mez ‘výstraha’ a dále pro poplachovou mez ‘nebezpečí’.

Analýza frekvenčního spektra

Frekvenční analýza umožňuje zobrazovat a vyhodnocovat velikost vibrací na různých frekvencích a tím identifikovat zdroj vzniku chvění. Tato analýza se provádí pomocí FFT (Rychlá Fourierova Transformace). FFT umožňuje rozložení signálu na jednotlivé frekvence a jejich zobrazení s příslušnými amplitudami.



Obrázek 7: Princip rozkladu pomocí FFT [2]

Aby se Fourierovou transformací získaly správné údaje, je potřeba přijímaný signál poněkud upravit a zamezit tak vzniku některých typických chyb při analýze. Jednou z těchto chyb je aliasing (chyba vzorkování). Řešením je použití anti-aliasingového filtru, který odstraní složky vyšší než polovinu vzorkovací frekvence. Dalším problémem je chyba únikem (chyba typu leakage). K chybě únikem dochází při snímání signálu, který není výrazně periodický a nastane tak jeho zkreslení. Pro odstranění této chyby se volí váhová okna.

Nastavení analyzátoru

Pro správné analyzování problému strojů je potřeba vhodně nastavit parametry měření. Mezi tyto parametry patří především:

- frekvenční rozsah
- počet spektrálních čar
- počet průměrů
- typ průměrování
- míra překrytí
- typ spouště

Počet spektrálních čar

Počet spektrálních čar určuje frekvenční rozlišení a viditelnost blízkých frekvencí.

Počet průměrů

Typ průměrování

Analyzátory obvykle umožňují tyto typy průměrování:

- lineární
- exponenciální
- s držením špičky

Míra překrytí

Typ spouště

Frekvence zdrojů vibrací

Otáčková frekvence

$$f_o = \frac{n}{60} \quad [3.1]$$

Ložisková frekvence

BPFI – závada na vnitřním kroužku

$$BPFI = \frac{i}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi\right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad [3.2]$$

BPFO - závada na vnějším kroužku

$$BPFO = \frac{i}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi\right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad [3.3]$$

BSF – závada na valivém tělísku

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi\right)^2\right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad [3.4]$$

FTF – závada na kleci

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi\right) \cdot \frac{RPM}{60} \quad [3.5]$$

kde:

i	počet valivých elementů	[-]
B _d	průměr valivého elementu	[mm]

P_d	střední průměr	[mm]
φ	kontaktní úhel	[°]
RPM	otáčky hřídele	[min ⁻¹]

Tribodiagnostika

Tribodiagnostika poskytuje informace o stavu mazacího systému. Nositelem informace je mazivo, které je podrobeno laboratornímu rozboru. Tento rozbor se provádí na zjištění míry degradace maziva a na obsah otěrových částic informující o opotřebení strojních dílů.

Při sledování degradace oleje se sledují tyto parametry:

- Viskozita
- Obsah vody
- Bod vzplanutí
- Číslo kyselosti
- Karbonizační zbytek
- Obsah nečistot

Dále je možno sledovat stav plastického maziva. Zde je ovšem problém v odebrání vzorku ze správného místa, aby zjištěné výsledky vypovídaly o skutečném stavu a nebyly zkresleny například čerstvým mazivem. U plastického maziva nedochází k promíchání jako u oleje a tak je obtížné tento vhodný vzorek k analýze odebrat. Pokud se i přesto analýza plastického maziva provádí, tak se hodnotí tyto parametry:

- Konzistence zahušťovadla
- Viskozita olejové složky
- Teplota skápnutí

Termodiagnostika

Slouží k získání údajů o zahřívání a tím o zvýšeném namáhání ložiska. Rozdělení metod měření teploty:

Kontaktní měření teploty – provádí se přiložením měřicího snímače na měřený povrch a provede se odečet hodnoty. Zásadní předpoklad pro správné měření kontaktními teploměry je volba vhodného místa pro umístění snímače. Místo by mělo umožňovat snadnou montáž a demontáž snímače a měl by být zajištěn co největší přestup tepla z měřeného objektu do snímače namísto úniku do prostředí.

Bezkontaktní měření teploty – pro měření se používají pyrometry, které snímají teplotu z míst, kde není možné použít kontaktní teploměry (např. rotační součásti). Princip měření spočívá ve snímání elektromagnetického záření, které vysílá měřený objekt. Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm se nazývá tepelné záření. Nevýhodou bezkontaktního měření je chybovost měření z důvodů špatného nastavení měřicího přístroje kvůli neznalosti správné hodnoty emisivity povrchu tělesa, hodnoty prostupnosti tepla mezi čidlem a objektem a nepřesné korekci parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

Termografie – zobrazuje a vyhodnocuje teplotní pole (tzv. termogram) povrchu měřeného objektu. Snímá se infračervená oblast elektromagnetického záření. Dělí se na pasivní a aktivní. Nejvíce používaná je pasivní termografie, jejím principem je snímání a zobrazování teplotních polí například mechanických strojů, u kterých se jejich činnostmi vyvíjí teplo. Tím se může zjistit, která část mechanického objektu je zdrojem největšího tepla a zjistit okamžitou teplotu v konkrétním místě.

Akustická diagnostika

Měření zvuku (resp. hluku) v oblasti 20 Hz – 20 kHz je další metoda, kterou je možno zjišťovat závady stroje. Pohybující se stroje produkují kmity, které se přenášejí do okolního prostředí. Toto šíření prostředím se zachycuje pomocí stetoskopu a subjektivně se vyhodnocuje pomocí sluchátek a zkušenosti diagnostika. Zkušené obsluze je toto měření schopno indikovat závady na opotřebeném ložisku, nečistoty nacházející se v něm a také nedostatečné mazání.

Měření hluku

Měřenou veličinou je nejčastěji akustický tlak a jeho hladina, které se snímají mikrofonom. Pro akustickou diagnostiku je nejvhodnější měřicí veličinou intenzita hluku, která se ale nedá měřit přímo, tak se pro měření používá dvoumikrofonní sonda. Díky této sondě lze určit energetické toky akustických zdrojů a tak směry jejich šíření. Pokud se ovšem vyskytuje více zdrojů hluku, je to obtížné. V praxi se používá odstínění rušivých akustických zdrojů.

3.3 Prostředky SKF k provádění vibrodiagnostiky

Společnost SKF nabízí několik přístrojů pro provádění technické diagnostiky v různých variantách, ale také poskytuje služby prováděním měření a vyhodnocení stavu zařízení. K dispozici jsou přístroje pro provádění tribodiagnostiky, termodiagnostiky, akustické diagnostiky, ale především jejím nosným pilířem je vibrodiagnostika, a to jak v oblasti přístrojů, tak v provádění měření krátkodobých či dlouhodobých kontraktů.

K provádění vibrační diagnostiky má SKF velmi propracovaný systém nazývaný SKF @ptitude, který je schopen propojit vzájemnou komunikaci mezi měřicími systémy a informačním řídicím systémem podniku. Dále také zajišťuje podporu při vyhodnocování naměřených dat a komunikaci mezi ostatními pracovníky v údržbě.

Vibrační analyzátory

SKF poskytuje tři typy analyzátorů:

- SKF Microlog AX
- SKF Microlog GX
- SKF Microlog 51-IS



Obrázek 8: Vibrační analyzátory SKF Microlog [20]

Vibrační analyzátory SKF Microlog umožňují měření vibrací v trase i mimo ni, dále se s jejich pomocí provádí provozní vyvažování, bez demontáže rotoru. Umožňují snímání i jiných veličin než vibrací a po připojení snímače otáček umožňují měření fáze. Díky těmto analyzátorům se provádějí složité rozborů naměřených dat, které umožňují odhalovat závady strojů a jejich příčiny.

Laserový vibrometr SKF MSL-7000

MSL-7000 je snímač, který umožňuje bezkontaktně měřit vibrace na strojích pomocí laseru. Srdcem vibrometru je laserový Dopplerův vibrometr (LDV), což je přesný optický převodník určený ke stanovení rychlosti vibrací a posunu v pevném bodě. Princip je založen na Dopplerově jevu – snímání posunu frekvence světla odraženého od pohybujícího se povrchu. Snímač je možno připojit na zařízení SKF Microlog nebo na on-line monitorovací systémy SKF.



Obrázek 9: Laserový snímač propojený s Micrologem [20]

Indikátor stavu stroje SKF CMSS 200

Slouží k monitorování vibrací a teploty stroje. Je napájen baterií a velmi kompaktní, takže jeho instalace je velmi jednoduchá. Indikátor provádí test každé tři hodiny a jeho integrovaná inteligence eliminuje možnost falešných alarmů. K signalizaci slouží tři barevné diody, které upozorní na poplachový stav po prováděném měření.



Obrázek 10: Indikátor stavu stroje [20]

SKF Machine Condition Advisor – CMAS 100-SL

Přístroj určený k snadnému monitorování strojů, který je schopen při měření dotekem snímat 3 veličiny, a to celkovou rychlost vibrací obálku zrychlení a teplotu. K přístroji je možno připojit i akcelerometr s magnetem a tak zvýšit přesnost měření. Přístroj je ideální pro použití v údržbě při pochůzkovém měření vibrací.



Obrázek 11: Přístroj pro měření vibrací [20]

Pro tvorbu kapitoly 3 bylo použito literatury [1], [2], [5], [6], [7], [10], [12], [15], [20].

4 Návrh diagnostiky pro kontrolované vřetení

4.1 Popis měřeného stroje



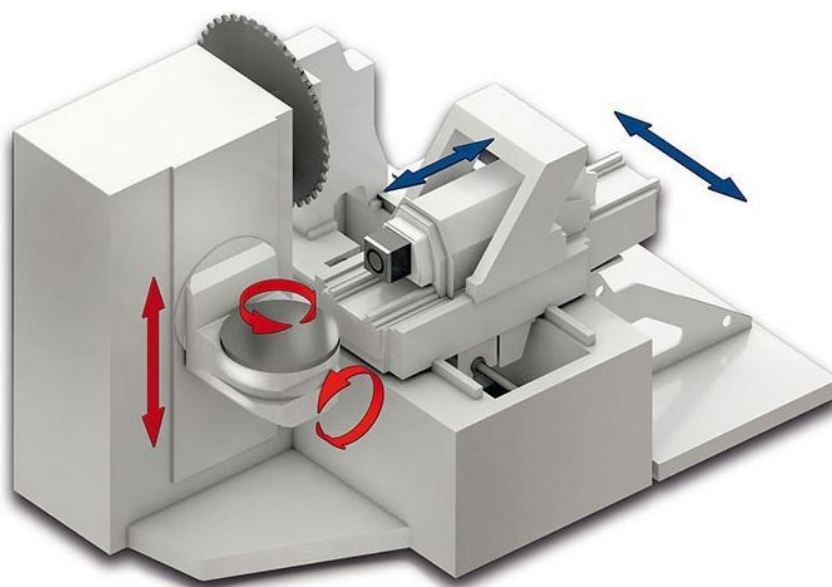
Obrázek 12: Obráběcí centrum GROB-WERKE typ G500 [17]

Tabulka 3: Základní údaje o obráběcím centru [17]

Axis travel in X/Y/Z [mm]	800/950/865
Speed (max.) in X/Y/Z [m / min]	90/50/90
chip-to-chip time t1 acc. to VDI 2852 (min) [s]	3,1

Sledované vřeteno se nacházelo ve víceosém obráběcím centru vyrobené firmou GROB – WERKE s typovým označením G 500.

Obráběcí centrum bylo umístěno ve firmě Hyundai Motor Manufacturing Czech s.r.o. na obrobně převodovek, kde provádí 12 operací na jednom kuse převodovky a to vrtání, vystružování a tvoření závitů. Za jednu směnu projde přes stroj 195 kusů převodovek. Vřeteno obráběcího centra má odpracováno 1071 hodin při první návštěvě. Dle informací obsluhy je životnost vřetene asi 7000 hodin (min 4000 a max 11000 hodin). Celkem má stroj v době prvního měření odpracováno 28249 hodin a data spuštění 20. 6. 2007.



Obrázek 13: Zobrazení pohybových os [17]

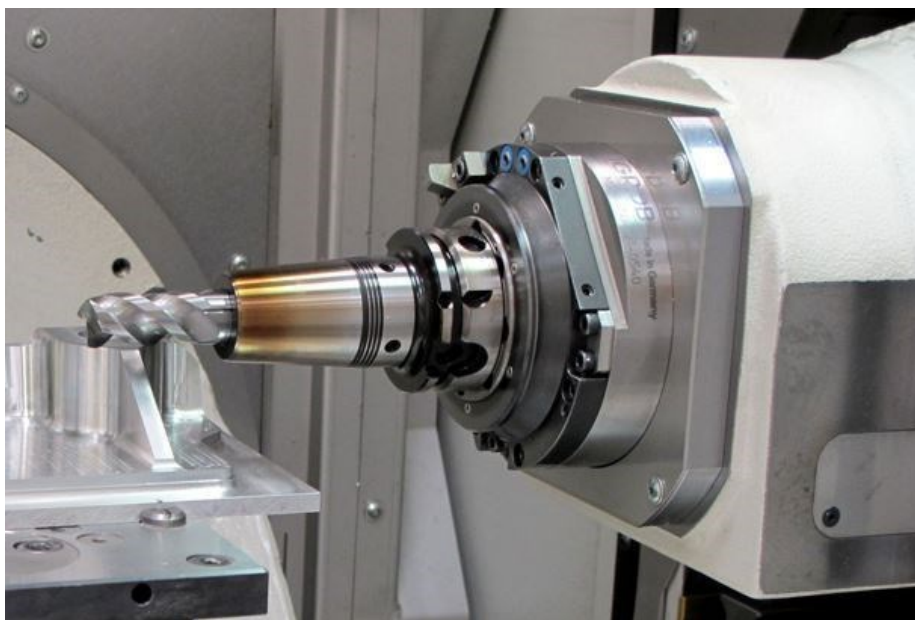
Informace o vřeteni

Nástrojové vřeteno nacházející se v obráběcím centru je od výrobce Step-Tec a nese typové označení HPC 150-X. Vřeteno je poháněno synchronním motorem, který je součástí vřetene a regulován je pomocí koncového stupně střídače. Vřeteno má zabudován systém snímání ozubených kol, který podává frekvenčnímu měniči (regulátoru) přesnou polohu vřetenové hřídele. Toto umožňuje regulátoru pohánět motor s regulací podle polohy nebo otáček. Hřídel vřetene je uložena na hybridních ložiskách a jejich mazání je realizováno jednorázovým naplněním plastickým mazivem v továrně. Utěsnění je provedeno speciálním

labyrintovým těsněním a systémem uzavíracího vzduchu, což zabraňuje vnikání cizích těles a médií do ložisek. Ložiska s kosoúhlým stykem jsou předepnuta hydraulicky. Nástroje se ve vřetení uchycují systémem HSK za pomoci balíku talířových pružin a uvolnění nástroje se provádí stlačením těchto pružin hydraulickým válcem. Ve vřetení je integrován systém chlazení s chladicími kanálky, aby reguloval negativní vliv ztrátového tepla motoru.

Tabulka 4: Technické údaje vřetene [18]

Název	Hodnota	Jednotka
Průměr vřetene	150	mm
Výkon vřetene	39	kW
Krouticí moment vřetene	47	Nm
Otáčky vřetene	18000	min ⁻¹
Rozhraní nástroje	A 63	HSK



Obrázek 14: Detail konce vřetene s nástrojem [17]



Obrázek 15: Pohled na samostatné vřeteno [17]



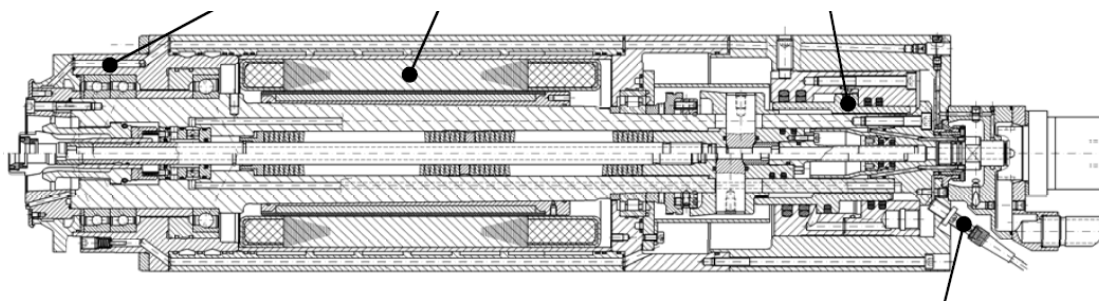
Obrázek 16: Zadní pohled na obráběcí centrum



Obrázek 17: Zadní pohled na vřeteník



Obrázek 18: Pohled na vřeteno s nástrojem



Obrázek 19: Řez vřetenem [18]

4.2 Aplikace vibrodiagnostiky

Pro sledování stavu obráběcího centra se zdá být nejvhodnější metoda měření vibrací, protože touto metodou jsme schopni detekovat i malé změny týkající se stavu stroje a případně i odhalovat příčiny těchto změn.

Na měření mechanického kmitání obráběcích strojů na kovy odkazuje norma ČSN 20 0065, dle které se provádí měření rychlosti a výchylky vibrací. Norma je z roku 1992, takže nemusí odpovídat v celém měřítku současným potřebám u moderních vřeten, avšak novější česká norma není vytvořena. Určení mezních hodnot naměřených vibrací a podmínek měření se provádí dle druhu stroje. Pro sledovaný stroj v této práci norma uvádí následující postup měření:

Obráběcí centra a bezobslužné obráběcí stroje pro nerotační součásti

1. Místo měření

Na vřeteníku v blízkosti předního ložiska vřetena postupně ve směru svislém, čelním a bočním.

2. Podmínky měření

Vřeteník je ve střední poloze, vřeteno, pokud je výsuvné, je zasunuto. Posuvy jsou vypnuty. Otáčky vřetena jsou určeny podle čl. 9. Ve vřetenu je upnut vyvážený nástroj nebo maketa nástroje.

3. V předepsaných místech a směrech se měří efektivní hodnota (RMS) rychlosti v_c a výchylky s_c kmitání.

4. Stanovené mezní hodnoty kmitání pro stroje s kuželovou dutinou ve vřetenu:

Dutina	do 50	nad 50
mezní hodnoty $v_c \text{ mez}$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1,12	1,8
$(s_c \text{ mez}$ (μm))	10	18)

(ČSN 20 0065, 1992, 6-7)

U vřeten je vhodné měřit vibrace nejen za provozu, ale i za klidu, aby bylo možno oddělit vibrační špičky, které mají příčinu mimo obráběcí stroj (například od sousedního stroje).

Pro měření vibrací na vřeteni je možno zvolit dva způsoby měření:

- off-line měření
- on-line měření

Aby mělo měření vibrací správnou vypovídací schopnost, je nutné provádět toto měření za stejných podmínek, jako jsou otáčky, zátěž, stejný nástroj apod. Proto se do Softwaru na řízení obráběcího centra musí nahrát program, který na 2 až 3 minuty (dle doby měření) spustí režim, při kterém se bude vždy měření provádět a tím zajistit možnost porovnávání dat v průběhu času.

V předchozím odstavci byly popsány podmínky pro kontrolu stavu vřetene, což není jediný způsob měření vibrací. Při pracovním režimu vřetene může někdy docházet k nárazům tzv. crashům nástroje na obrobek a tím se můžou předčasně poškozovat součásti vřetene. Z tohoto důvodu se provádí i měření vibrací na detekování těchto nárazů, což je možno realizovat pouze on-line monitorováním.

Pro tvorbu této kapitoly bylo použito literatury [16], [17], [18].

5 Měření vřetene

Měření vřetene bylo provedeno jak pochůzkovou metodou pomocí analyzátoru, tak on-line metodou. Sledovanou veličinou byla rychlost vibrací VEL [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$], zrychlení ACC [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$] a obálka zrychlení ENV [g].

5.1 Použitý měřicí přístroj pro off-line měření

Pro měření vřetene byl zvolen analyzátor od SKF řady MICROLOG CMXA 75.



Obrázek 20: Měřicí přístroj SKF Microlog CMXA 75 [20]

Popis přístroje

Přístroj SKF Microlog CMXA 75 je z rodiny GX série. Jedná se o analyzátor, který je schopen pracovat jak v trase tak mimo ni. Analyzátor disponuje mnoha moduly, které jsou v přístroji aktivovány dle zakoupené varianty. Mezi tyto moduly patří:

- pochůzka
- vyvažování
- nahrávání dat
- FFT analýza
- automatické vyhodnocení

- rozběh a doběh
- funkce frekvenční odezvy
- test vřeten
- akustické měření

Analyzátor může měřit na 1 až 4 kanálech. Měřicí rozsah FFT je do 85 kHz a rozlišení do 25600 čar.

Nastavení přístroje

Nastavení přístroje pro jednotlivá měření bylo provedeno dle doporučení SKF založeného na dlouhodobém zkoumání.

Tabulka 5: Hodnoty pro nastavení analyzátoru

Veličina	f_{\min}	f_{\max}	Hodnota	Počet čar	Počet průměrů	Okno	Vstupní filtr
VEL	10	1000	RMS	3200	5	Hanning	-
ACC	0	3200	Špička	6400	5	Hanning	-
ACC 1	5	10000	Špička	6400	5	Hanning	-
ENV 3	0	10000	Špička–Špička	12800	1	Hanning	500-10k Hz
ENV 3.1	0	1000	Špička–Špička	1600	1	Hanning	500-10k Hz
ENV 4	0	5000	Špička–Špička	6400	1	Hanning	5k-40k Hz
ENV 4.1	0	1000	Špička–Špička	1600	1	Hanning	5k-40k Hz

Měřicí místa

Při pochůzkovém měření vibrací bylo zvoleno místo pro upevnění snímače na předním konci vřetene z pracovní strany nástroje, což bylo zvoleno s ohledem na rychlou dostupnost a co nejmenší ovlivnění chodu výroby. Zároveň je to místo, které se nachází nejblíže k ložiskům s největší koncentrací zatížení. Měření bylo provedeno v radiálním a

axiálním směru. Jako snímač vibrací byl zvolen piezoelektrický akcelerometr, který byl upevněn na vřetenu pomocí magnetu. Při měření z tohoto místa je potřeba dbát zvýšené opatrnosti, protože k měření dochází při chodu vřetene a to v našem případě bylo při 7000 otáčkách za minutu.



Obrázek 21: Měření vibrací přístrojem SKF Microlog CMXA 75

5.2 Použité měřicí zařízení pro on-line měření

Pro on-line měření byla zvolena ústředna IMx-S pro vzdálenou diagnostiku poskytnutá firmou SKF a.s. Pomocí ústředny je možno monitorovat vibrace, teplotu, otáčky a provozní parametry, jako jsou tlak, proudové zatížení, hladina oleje apod.

Ústředna má následující technické údaje:

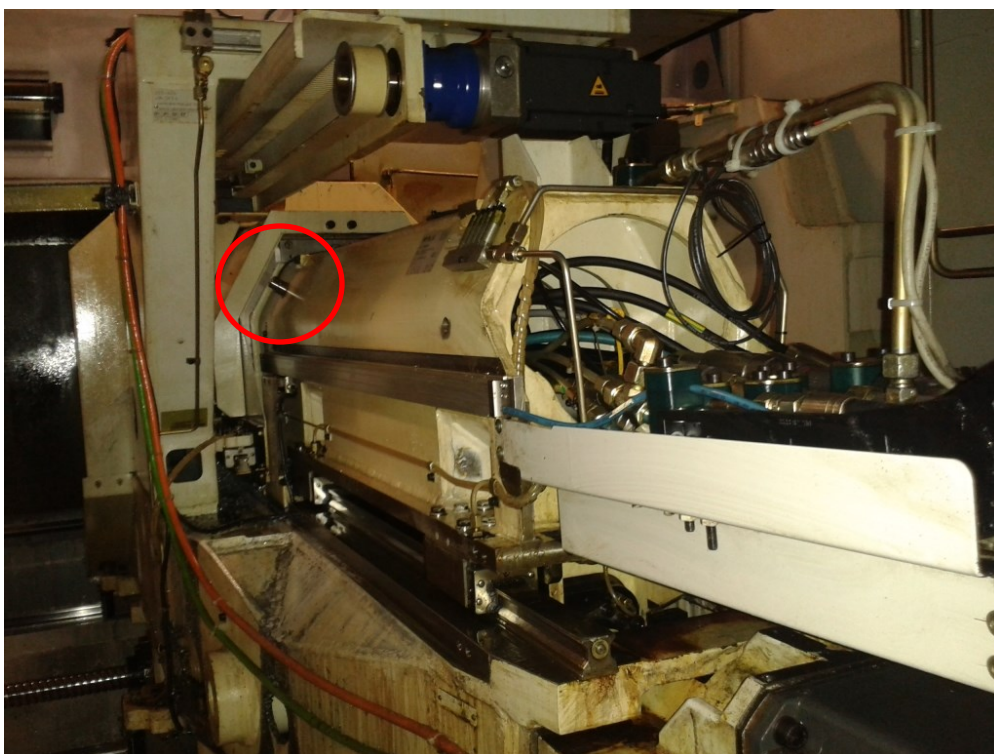
- 16 (resp. 32) analogových kanálů
- 8 digitálních (resp. otáčkových) vstupů
- komunikace přes ethernet, RS232, RS 485, CAN
- měření na všech kanálech až do $F_{\max} = 40 \text{ kHz}$
- software SKF @ptitude Monitoring Suite



Obrázek 22: Ústředna pro vzdálené on-line monitorování

Měřicí místa

Při provádění on-line měření pomocí ústředny IMx-S bylo zvoleno jiné místo než při provádění off-line měření. Protože snímače byly nainstalovány po celou dobu připojení vřetena na ústřednu, provedlo se umístění z opačné strany pracovního prostoru z důvodu poškození snímačů a kabelů. I zde byla snaha umístit snímače co nejbližší přednímu konci vřetene.



Obrázek 23: Umístění snímače při on-line monitorování

5.3 Analýza naměřených dat

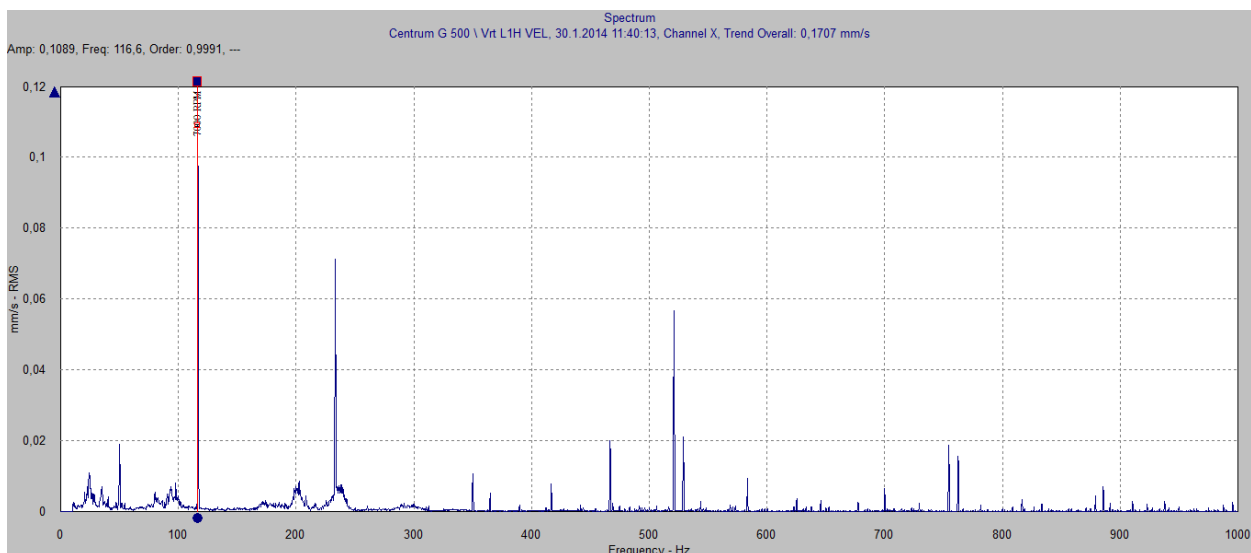
Analýza naměřených dat byla provedena ve třech stupních:

1. Analyzování spekter
2. Analyzování dat při pochůzkovém off-line měření
3. Analyzování dat při on-line monitorování

Analýza spekter získaných analyzátozem

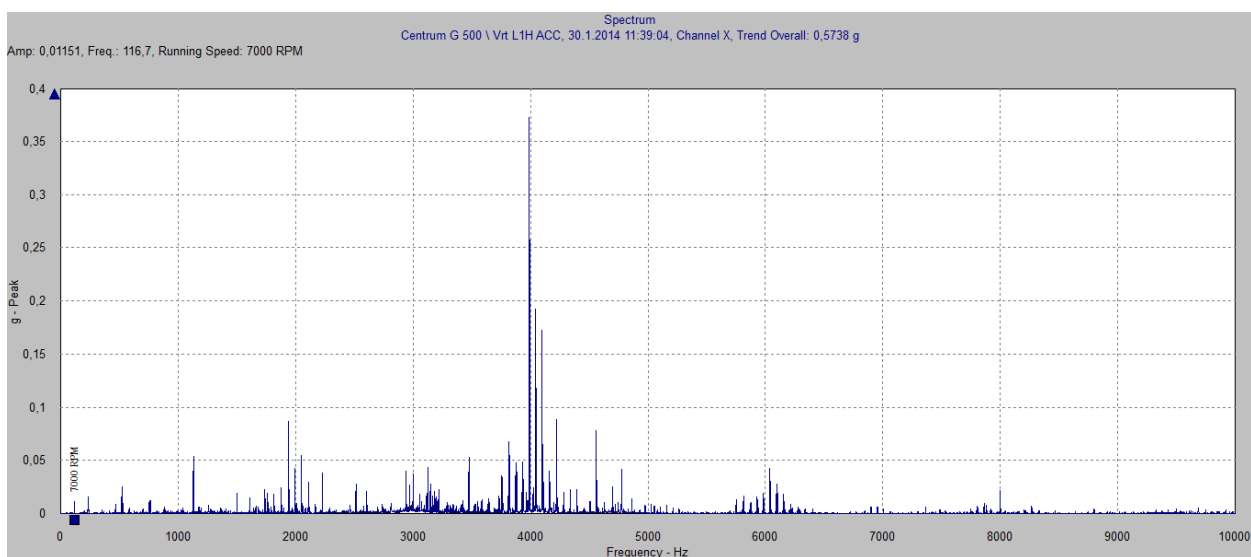
Pro tvorbu diplomové práce nebyly poskytnuty informace o rozměrech ložisek. Jediné dostupné informace jsou z návodu na údržbu, ze kterého je možno zjistit, že ložiska jsou hybridní a dále ze sestavy vřetene je možno vidět, že hřídel je uložena na 3 kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem na předním konci a na válečkovém ložisku v zadním konci vřetene.

Na obrázku č. 24 je červeným kurzorem označena otáčková frekvence 116,6 Hz, je to zároveň největší špička rychlosti (VEL) s hodnotou 0,1089 mm/s. Druhá nejvyšší špička je 2x otáčková frekvence. Velikost amplitudy je na nízké úrovni, tudíž není potřeba uvažovat o nějakém poruchovém stavu.

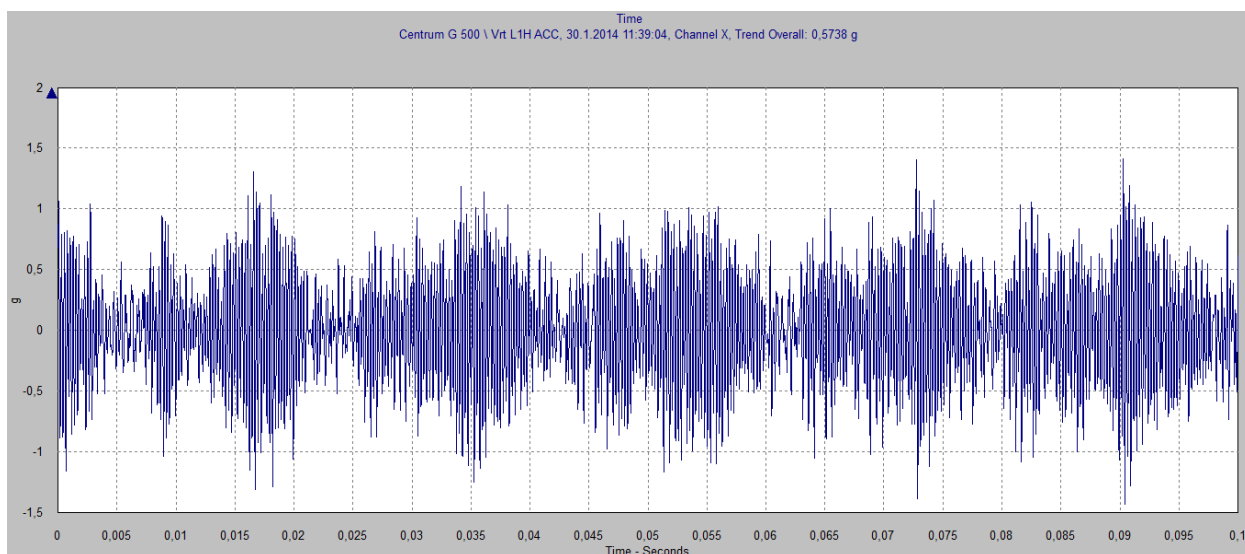


Obrázek 24: Frekvenční spektrum rychlosti VEL

Na obrázku č. 25 se okolo frekvence 4000 Hz vyskytuje výrazná špička zrychlení (ACC) s hodnotou 0,37 g, což dle mého úsudku může způsobovat i synchronní motor, který pohání vřeteno. Toto je možno pozorovat i na časovém spektru ACC na obrázku č. 26.

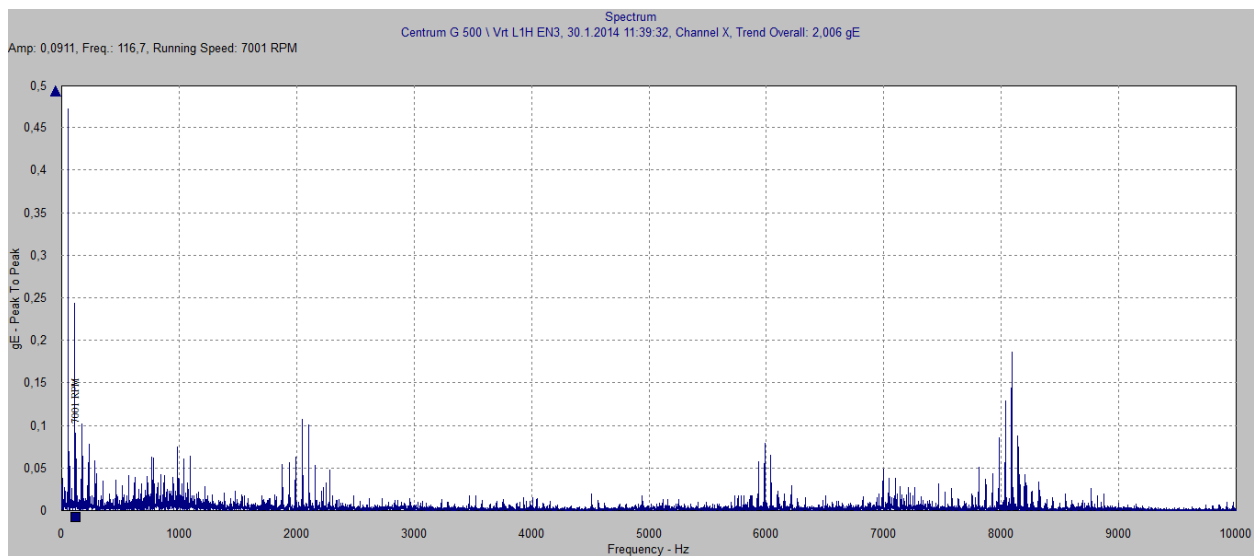


Obrázek 25: Frekvenční spektrum zrychlení ACC

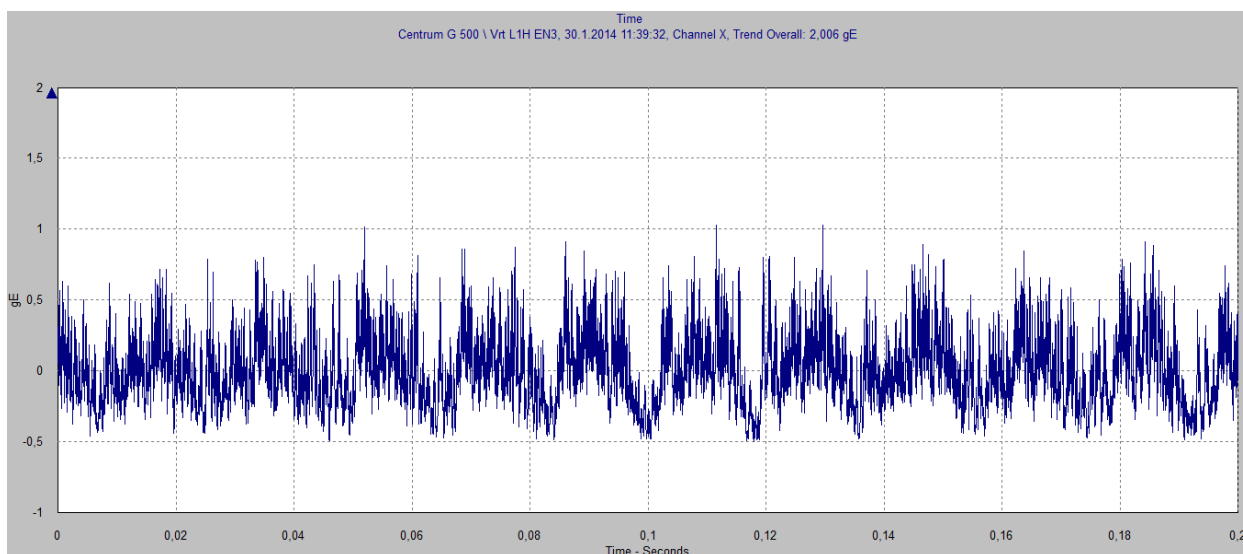


Obrázek 26: Časové spektrum zrychlení ACC

Na obrázku č. 27 se nevyskytují žádné špičky obálky zrychlení (ENV), které by měly nějakou vypovídací hodnotu o špatném stavu vřetene a také jsou celkově hodnoty na nízké úrovni. Ten stejný průběh je možno pozorovat i v časovém spektru ENV na obrázku č. 28.

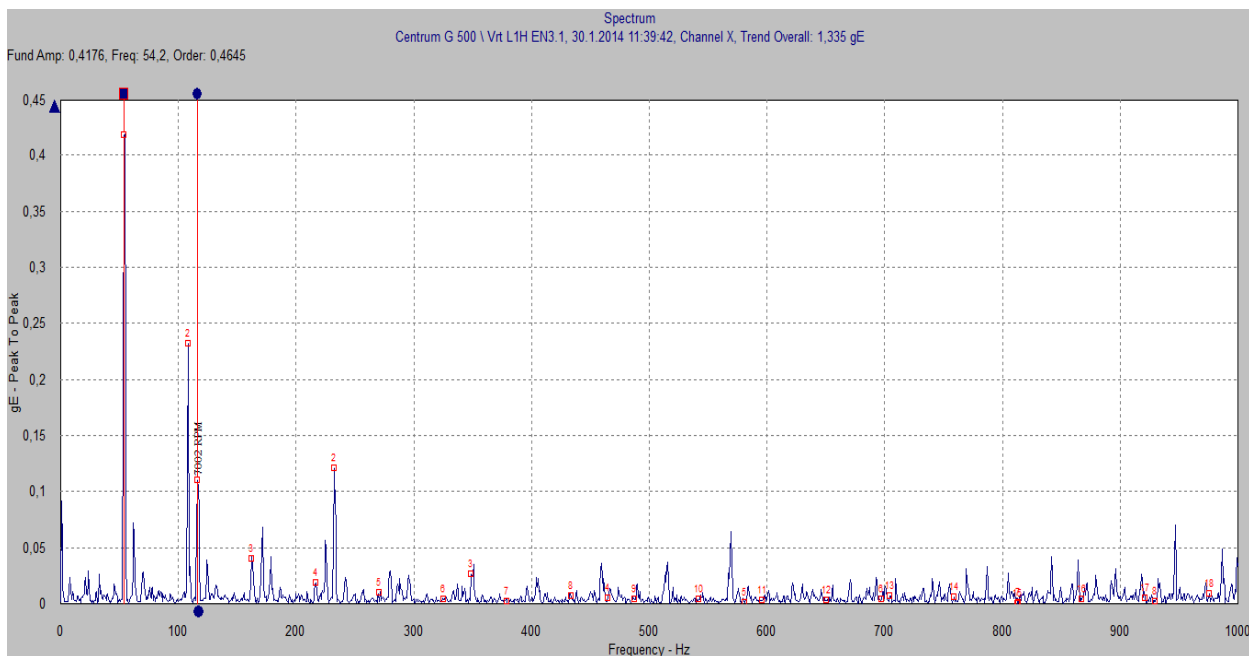


Obrázek 27: Frekvenční spektrum obálky ENV 3



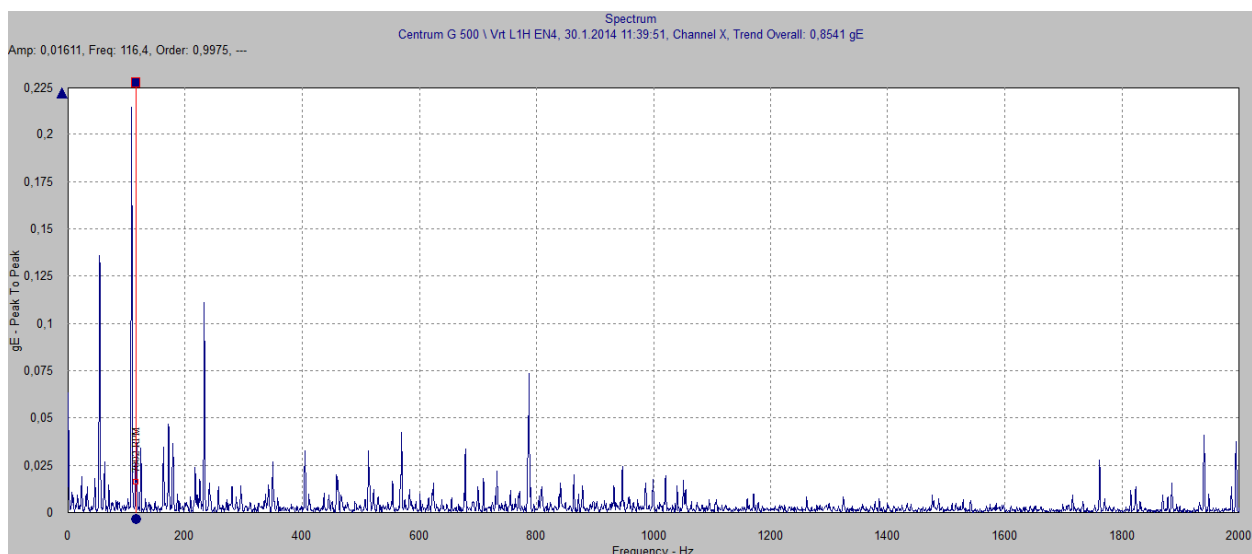
Obrázek 28: Časové spektrum obálky ENV 3

Na obrázku č. 29 je červeným kurzorem zobrazena jak otáčková frekvence (7000 RPM), tak maximální špička ENV na frekvenci 54,2 Hz. Hodnota maximální špičky je 0,4175 gE, která je pod doporučenou poplachovou hodnotou. Na obrázku jsou znázorněny i její násobky. Otázkou je, co je příčinou této špičky? Z obrázku je patrné, že tato špička je 0,4645x otáčková frekvence. Umístěním by odpovídala na počáteční poškození klece, ale otázkou je, jestli je to opravdu tak a případně jaké poškození na kleci může být.

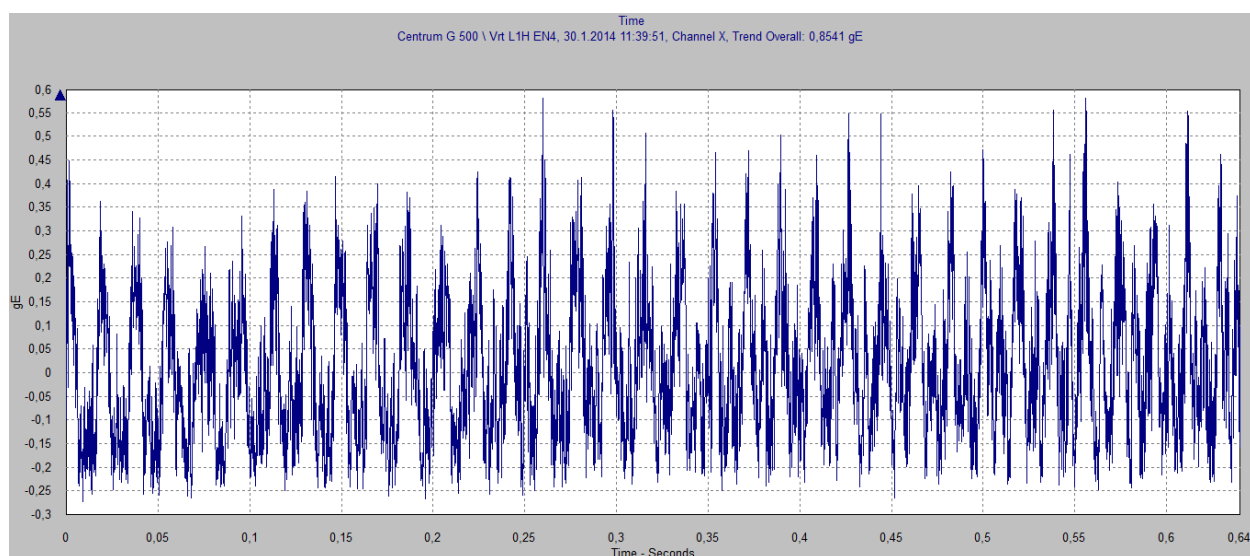


Obrázek 29: Frekvenční spektrum obálky ENV 3.1

Na obrázku č. 30 je možno pozorovat podobnou charakteristiku jako na obrázku č. 29 s nastavením jiného vstupního filtru. Zde 2x frekvence od možného počínajícího poškození je větší než 1x frekvence. Kurzorem je označena otáčková frekvence s hodnotou amplitudy 0,01611 gE. Vzhledem k tomu, že velikost amplitudy není velká a ovlivnění přesnosti není žádné, tak bych zatím nedělal rozhodnutí o provádění nápravných opatření, ale použil bych to jako podnět pro srovnání s dalším měřením. Stejný průběh lze prohlédnout i v časovém spektru na obrázku č. 31 té samé veličiny v tutéž dobu.



Obrázek 30: Frekvenční spektrum obálky ENV 4

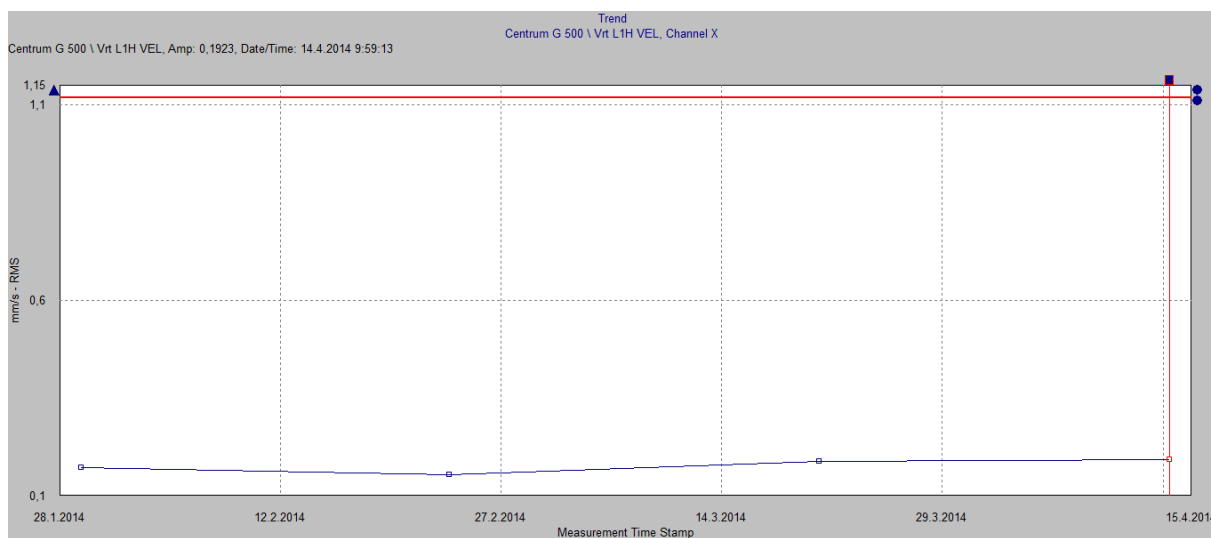


Obrázek 31: Časové spektrum obálky ENV 4

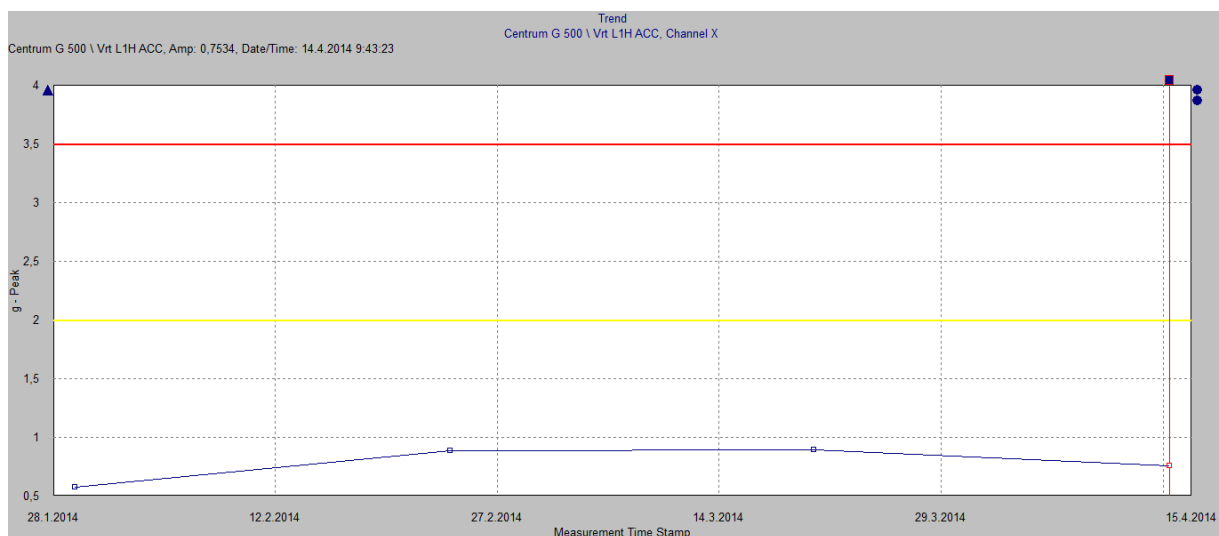
Analýza dat při pochůzkovém off-line měření

Níže na obrázcích jsou znázorněny trendy off-line pochůzkového měření jednotlivých veličin modrou barvou, jako je rychlost vibrací VEL, zrychlení ACC, zrychlení obálky ENV, v závislosti na době měření. Měření bylo provedeno za stejných podmínek se stejným obráběcím nástrojem. U některých grafů je možno pozorovat neměnný stav, kdežto u jiných jako obrázky č. 34 a č. 35, kde se měří obálka zrychlení ENV 3 a ENV 3.1, došlo při třetím měření k vychýlení hodnot a u čtvrtého opět k ustálení. Vzhledem k tomu, že nedošlo k postupnému nárůstu čtvrtým měřením, lze usuzovat na nesprávně provedené měření, jako například neúplně dolehnutý magnet na stykovou plochu, nebo na nějaký jev ve vřetení, který byl náhodný a neměl trvalý charakter.

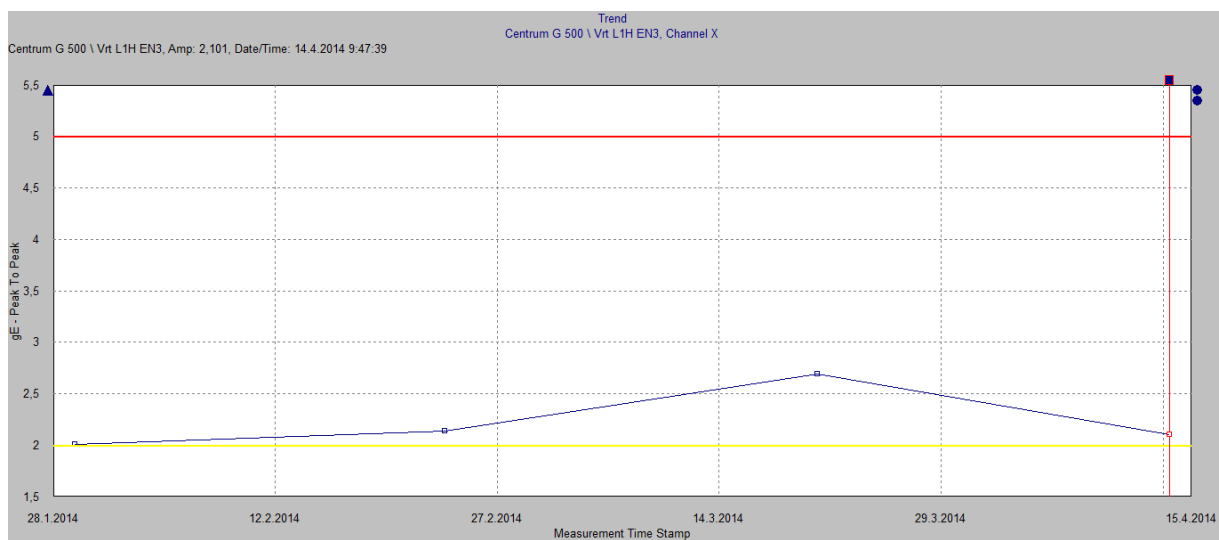
V grafech jsou vodorovně vyznačeny hranice poplachu. Žlutá označuje poplach „výstraha“ a červená označuje poplach „nebezpečí“. Poplachu jsou nastaveny na základě konzultace s SKF a s ohledem na otáčky vřetene (u rychlosti VEL i dle ČSN 20 0065), ale v případě dlouhodobého měření a provádění zpětné vazby ve smyslu dostatečnosti hodnot těchto poplachů, by bylo možno poplachu upravit.



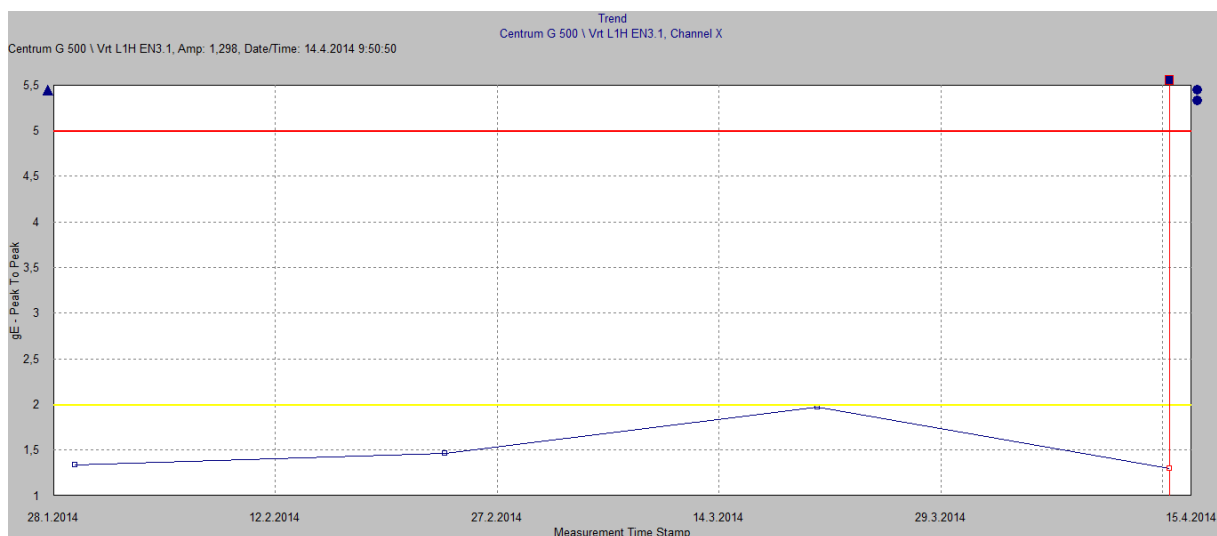
Obrázek 32: Trend rychlosti VEL



Obrázek 33: Trend zrychlení ACC

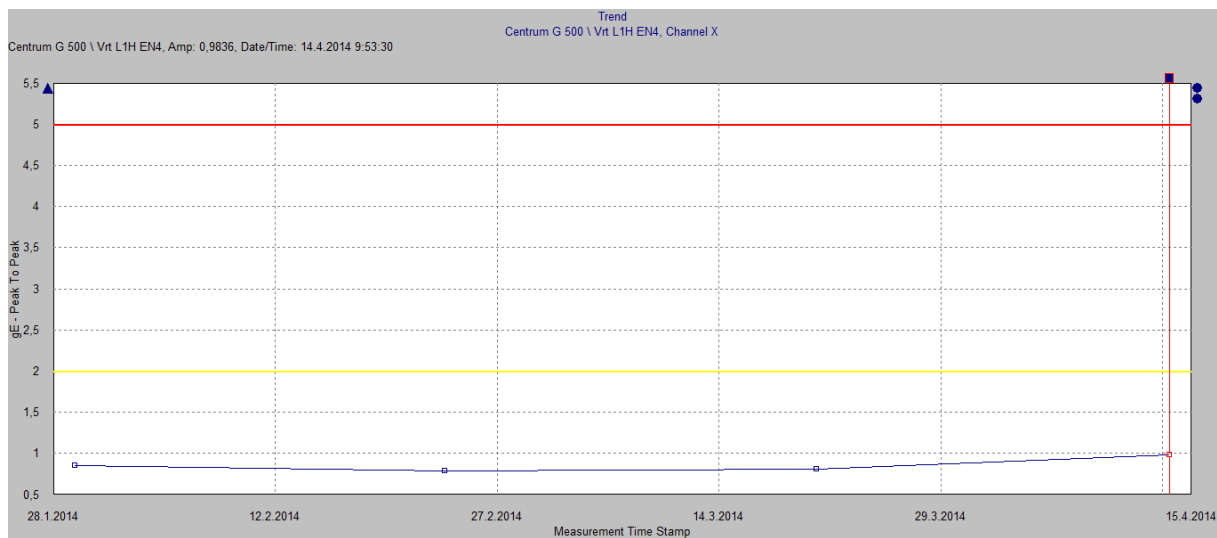


Obrázek 34: Trend obálky zrychlení ENV 3

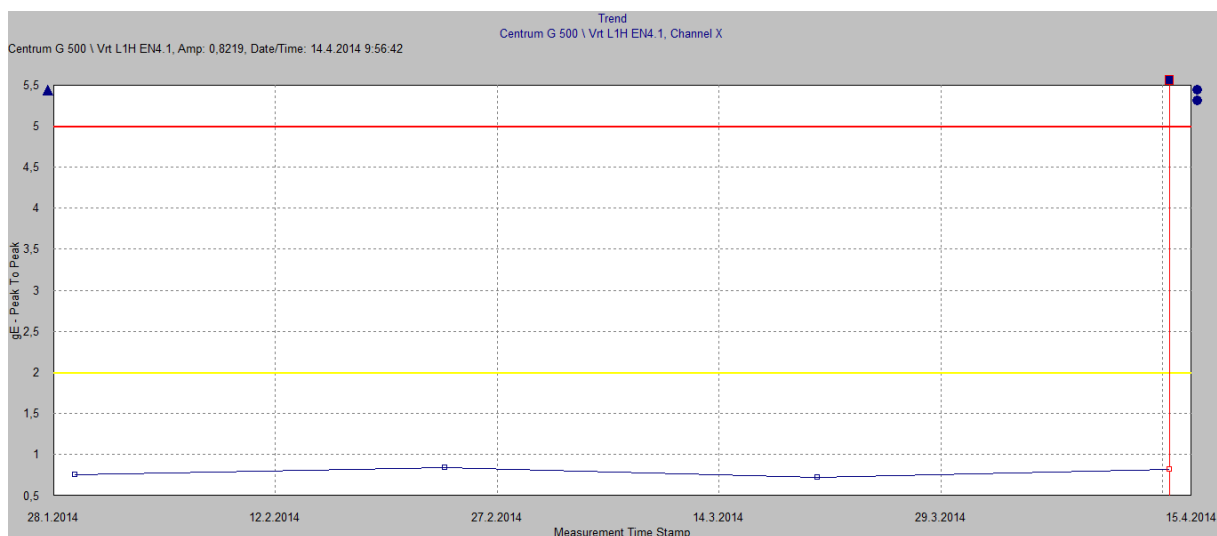


Obrázek 35: Trend obálky zrychlení ENV 3.1

Na obrázcích č. 34 a č. 35 je znázorněno, že naměřené hodnoty obálky zrychlení byly na hranici poplachu „výstraha“. Jelikož frekvenční analýzou nebyla odhalena nějaká znatelná závada, která by bránila dalšímu provozu a přesnost výroby nebyla zhoršena, tak bych navrhol posunout hranici poplachu „výstraha“ směrem nahoru, aby nedocházelo ke zbytečnému odstavování stroje.



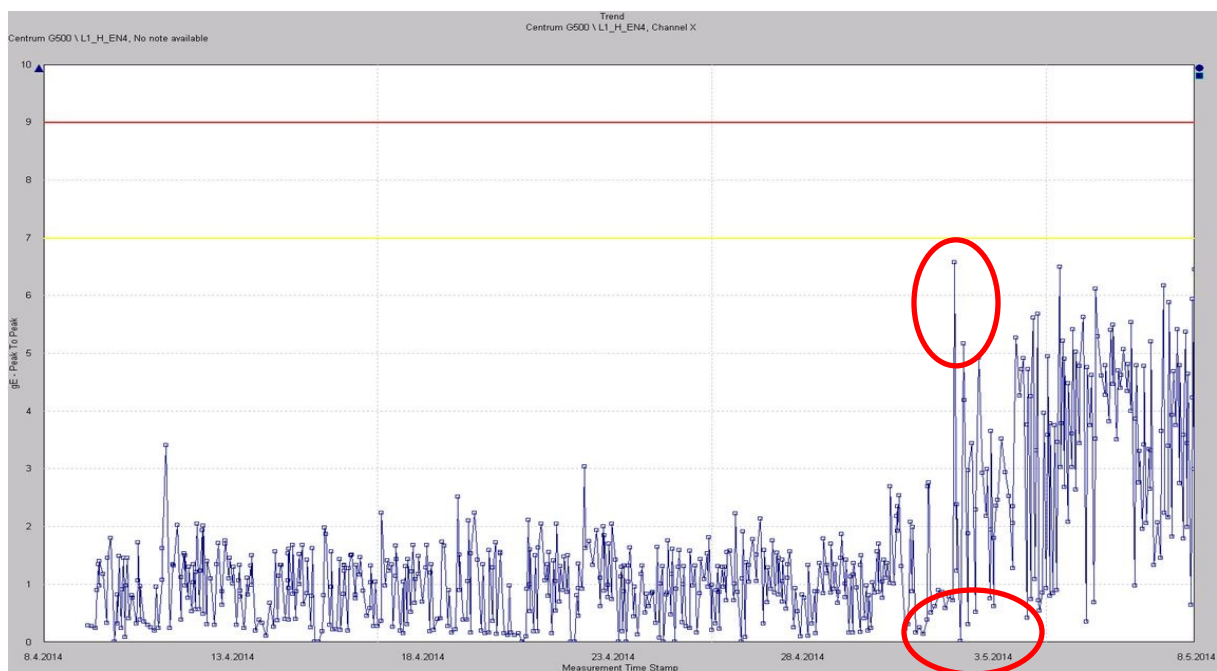
Obrázek 36: Trend obálky zrychlení ENV 4



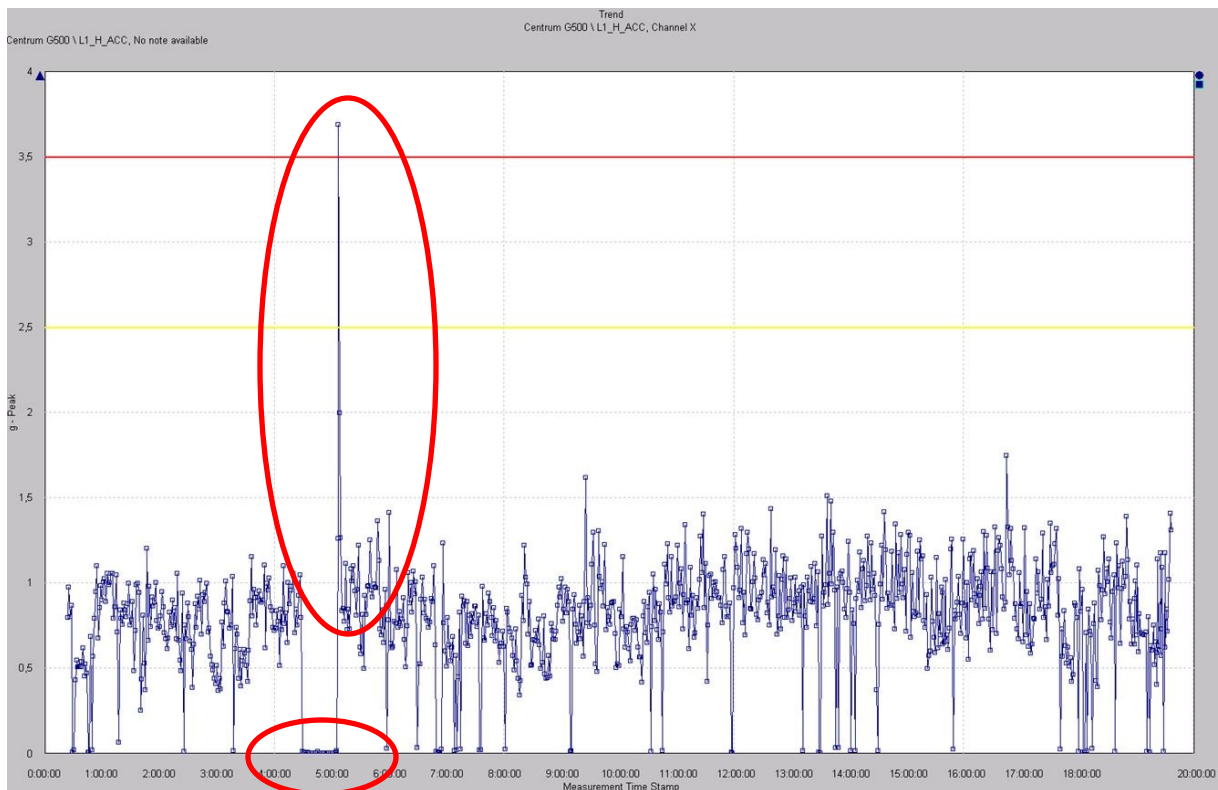
Obrázek 37: Trend obálky zrychlení ENV 4.1

Analýza dat při on-line monitorování

Z měsíčního on-line monitorování obálky EN 4 (snímání dat po 30 minutách) byl vytvořen trend na obrázku č. 38. V trendu je možno zaznamenat, že dne 2. 5. došlo k prudkému nárůstu amplitudy, která se poté držela dále na vyšších hodnotách. Hodnoty špiček sice nedosáhly prvního poplachového stavu „výstraha“, ale je jasné, že se událo něco, co ovlivnilo další chod vřetene. Z analýzy trendu na obrázku č. 39, kde je znázorněno, jak se vyvíjelo zrychlení ACC v rozsahu 20 hodin v době, kdy došlo k náhlému zvýšení výchylky obálky, je pozorovatelná doba, kdy byl stroj zastaven a zřejmě došlo k výměně nástroje. Zde je možné usuzovat, že neproběhla správně kalibrace nového nástroje a po najetí k obrobku došlo pravděpodobně k nárazu (tzv. crash). V okamžiku nárazu byly překročeny oba poplachové stupně zrychlení ACC a poté se zrychlení ustálilo. Poplachové meze u ENV a ACC byly nastaveny dle otáček vřetene a konzultace s SKF.

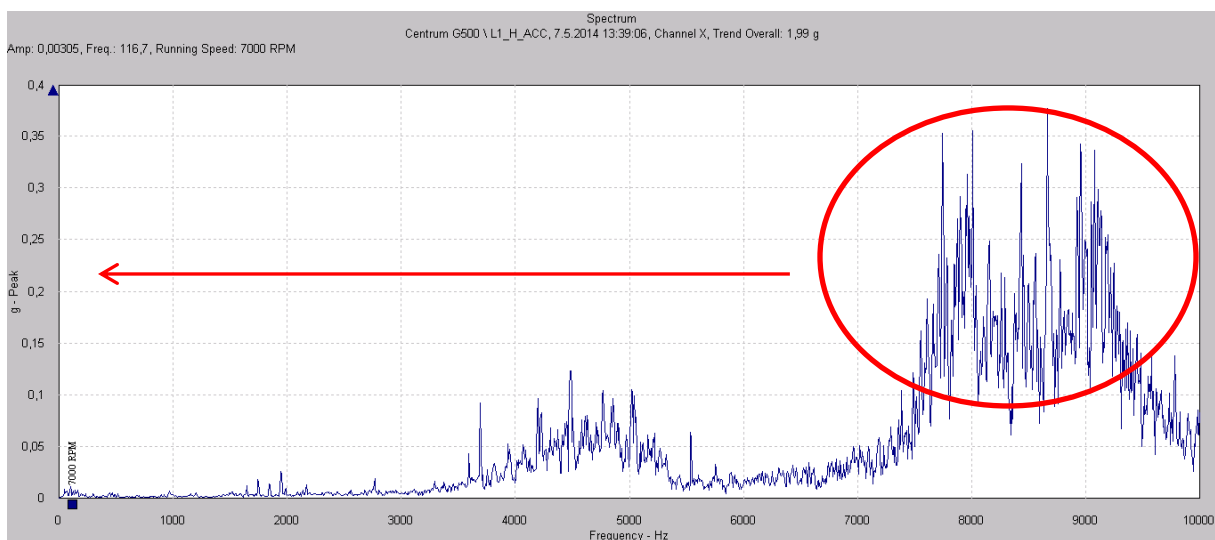


Obrázek 38: Trend obálky ENV 4 za 1 měsíc

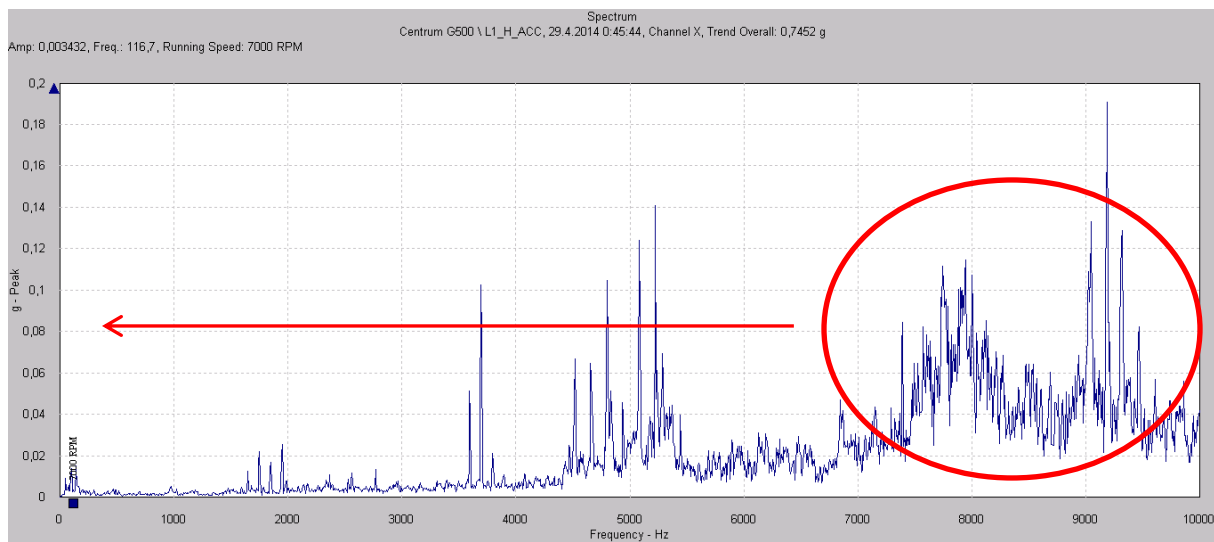


Obrázek 39: Trend zrychlení ACC za 20 hodin

Na obrázcích č. 40. a 41. znázorňující spektra pořízená z on-line monitorování před a po nárazu detekovaném na obrázku č. 38, je ukázka srovnání mohutnosti zrychlení ACC v oblasti vysokých frekvencí asi nad 6000 Hz, kde se nachází tzv. rezonanční kopec, který napovídá o stavu ložisek. Z obrázků je patrné, že před nárazem jsou menší amplitudy než po nárazu, z čehož lze usuzovat, že došlo k určitému zhoršení stavu ložisek



Obrázek 40: FFT spektrum zrychlení on-line ze dne 7. 5. (po nárazu)



Obrázek 41: FFT spektrum zrychlení on-line ze dne 29. 4. (před nárazem)

5.4 Zhodnocení možností použití vibrační diagnostiky

Po provedení vibrační diagnostiky na vřetení dvěma způsoby sběru dat, je možno utvořit názor o vhodnosti některé z těchto metod.

Provádění pochůzkového off-line měření má výhodu v tom, že se žádným způsobem nezasahuje konstrukčně do prostor obráběcího centra a pokud jsou sběr a analýza prováděny externí firmou, jsou vynaložené náklady pouze za provedenou službu a není třeba investovat do diagnostického zařízení a vzdělání technika, který by prováděl měření. Na druhou stranu se pochůzkovým měřením zjišťují jen částečně informace o stavu vřeten a okamžik vzniku poruchy není detekován ihned, ale až při další periodě pochůzky. Tímto způsobem lze kontrolovat stav vřetene při spuštění bez zátěže, ale co se s ním děje v pracovním režimu se pomocí metody off-line nezjistí.

Pro dlouhodobé sledování stavu vřetene je vhodné provádět on-line monitorování, které je implementováno do procesních řídicích a kontrolních systémů podniku. Pro on-line monitorování je potřeba nastavit poplachové hodnoty, při kterých bude jasně definovaný další postup činnosti. Výhodou on-line monitorování je možnost sledovat chování stroje v průběhu pracovní činnosti a tak detekovat nějaké nežádoucí stavy, které mají i náhodný charakter, příkladem může být přehled o vznikaní tzv. crashů při nárazu nástroje na obrobek. Tímto je možno odhalit chyby v kalibrování nástroje například po výměně.

Jakmile je detekován poplachový stav, je možno provést frekvenční analýzu a odhalit tak příčinu vzniku nežádoucího provozního stavu.

Další výhodou je včasné upozornění na zhoršení stavu vlivem opotřebení a s předstihem se tak připravit na výměnu vřetene tak, aby nedošlo k zastavení výroby ve chvíli, kdy to není žádoucí a zajistit tak i co nejkratší dobu pro provedení opravy.

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zhodnotit možnosti technické diagnostiky a to především měření mechanického chvění tzv. vibrodiagnostiky pro kontrolování provozního stavu vřetene víceosého obráběcího centra. Důvodem je včasná informovanost o zhoršujícím se provozním stavu vřetene, který by měl za následek zhoršení výroby, vznik neplánovaných prostojů nebo rozsáhlejší poškození stroje. Dále je také snaha mít včas informace o zhoršeném stavu, aby bylo možné již v raném stádiu odstraňovat příčiny vzniku tohoto stavu.

Při vypracování diplomové práce jsem postupoval tak, že jsem rozebral obecnou problematiku týkající se vřeten obráběcích strojů, abych se hlouběji seznámil s jejich specifickými vlastnostmi a podmínkami provozu. Dále jsem rozebral problematiku metod technické diagnostiky, které by bylo možno aplikovat na vřetena obráběcích strojů, z nichž jsem zaměřil hlavně na vibrační diagnostiku, která je vhodná pro odhalování již raných stádií vzniku poruch a také pro určování jejich příčin.

Pro kontrolu vřeten bylo navrženo měření vibrací ve třech fázích, kdy se provedlo nejprve měření analyzátozem s hodnocením spekter rychlosti (VEL), zrychlení (ACC) a obálky zrychlení (ENV). V druhé fázi se provedlo pochůzkové off-line měření ve čtyřech intervalech s měřením celkových hodnot VEL, ACC a ENV, kde byly nastaveny meze dle ČSN 20 0065 a posouzení podmínek provozu (především s ohledem na otáčky) spolu s doporučením SKF. Toto měření bylo realizováno na vřetení, které neprovádělo pracovní operace a bylo spuštěno v ustálených podmínkách. Nakonec ve třetí fázi bylo provedeno zkušební měření vibrací pomocí on-line monitorování probíhající 1 měsíc, u kterého docházelo k měření i při pracovních operacích obráběcího stroje, což posunovalo možnosti diagnostiky vřetene mnohem dále. Zde v průběhu měření byl zaznamenán náraz (crash), který měl zřejmě na svědomí nástroj potkaný s obrobkem při rychloposuvu z neprovedení správné kalibrace vyměněného nástroje. Po tomto nárazu se projevovaly zvýšené vibrace při měření ENV.

Z výsledků měření vyplývá, že k získávání spolehlivých informací o stavu vřetene ve všech provozních režimech je nejvhodnější použít on-line monitorování, které je propojeno

s procesními systémy a jakékoli překročení nastavených poplachů upozorní operátora výroby a ten může včas reagovat dle určených postupů.

V současné době v mnoha firmách nejsou nejproblémovější výdaje za opravy a náhradní díly, i když u vřeten se jedná o vysoké částky (řádově okolo 250 000 Kč u renomovaných firem) z důvodu složitosti a vysoké přesnosti. Mnohdy jsou horší finanční ztráty při vzniku neplánovaných prostojů, z čehož plyne, že důležitější než maximalizace provozní životnosti stroje pro úsporu nákladů na servis zařízení, je predikování zbytkové životnosti, aby bylo možno stroj odstavit plánovitě k provedení opravy ve vhodnou dobu, kdy to nejméně zasáhne do plynulosti výroby.

Do plynulosti výroby zasahuje rovněž negativně provádění off-line pochůzkového měření. Když si uvědomíme, že měření může probíhat například 3 minuty, tak za tu dobu obráběcí centrum neprovede operace na 1,2 převodovkách. Ještě hůře by vypadala náhlá porucha vyžadující výměnu vřetene, která by trvala například 5 hodin. V tom případě by se pozdržela výroba 122 převodovek. Když budu tedy předpokládat, že by nová převodovka měla cenu 50 000 Kč, tak by ztráta v době neplánovaného prostoje činila 6 100 000 Kč z nevyrobených převodovek. Toto je ovšem velmi hrubý odhad pro přiblížení negativních finančních dopadů při neplánovaných prostojích. Určení skutečné finanční ztráty by bylo dosti složité a pro mě vzhledem k dostupným informacím nemožné.

7 Seznam použité literatury

- [1] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D., *Technická diagnostika a spolehlivost I. Tribodiagnostika*. VŠB-TU Ostrava, 2004. 158 s. ISBN 80-7078-883-6.
- [2] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*. VŠB-TU Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [3] HRABEC, L., HELEBRANT, F., MAZALOVÁ, J., *Technická diagnostika a spolehlivost III. Ustavování strojů*. VŠB-TU Ostrava, 2007. 91 s. ISBN 978-80-248-1449-0.
- [4] HELEBRANT, F., *Technická diagnostika a spolehlivost IV. Provoz a údržba strojů*. VŠB-TU Ostrava, 2008. 130 s. 978-80-248-1690-6.
- [5] HELEBRANT, F., MONI, V., BLATA, J., *STUDIJNÍ PODKLADY - TERMOGRAFIE*. VŠB-TU Ostrava, 2010. 69 s.
- [6] BILOŠ, J., BILOŠOVÁ, A., *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*. VŠB-TU Ostrava, 2012. 142 s. Studijní opora..
- [7] BLATA, J., *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe*. VŠB-TU Ostrava, 2013. 133 s. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [8] KREIDL, M. a kol., *Diagnostické systémy*. Vydavatelství ČVUT, 2001. 352 s. ISBN 80-01-02349-4.
- [9] KREIDL, M., ŠMÍD, R., *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [10] TUMA, J., *Diagnostika strojů*. VŠB-TU Ostrava, 2009. 138 s. ISBN 978-80-248-2116-0.
- [11] LEGÁT, V., A KOL. *Management a inženýrství údržby*. Professional Publishing, 2013. 570 s. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [12] ČSN ISO 10816-1:98 *Vibrace. Hodnocení vibrací strojů měřených na nerotujících částech*.

Část I: Všeobecné směrnice

- [13] MAREK, J., *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. MM Průmyslové spektrum. 282 s. MKČR E 7645, ISSN 1212-2572, 2006.
- [14] BRYCHTA, J., *Výrobní stroje obráběcí*. VŠB-TU Ostrava, 2009. 150 s. 978-80-248-1893-1.
- [15] ČSN ISO 10816-3:99 *Vibrace. Hodnocení vibrací strojů měřených na nerotujících částech*.
- Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 min⁻¹ a 15 000 min⁻¹ při měření in situ.*
- [16] ČSN 20 0065:92 *Obráběcí stroje na kovy. Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-mezní hodnoty kmitání*.
- [17] *Informace o víceosém obráběcím centru G 500*, <http://www.grobgroup.com>
- [18] *Návod k údržbě a inspekci stroje G 500 vytvořený firmou GROB pro Hyundai Nošovice*
- [19] *Hight - precision bearing*, Publikation 6002 EN, SKF Groups 2008.
- [20] <http://www.skf.com>

8 Seznam příloh

Příloha č. 1	Strom databáze pro pochůzkové měření
Příloha č. 2	Nastavení hodnot pro jednotlivá měření analyzátozem
Příloha č. 3	Spektra z měření analyzátozem
Příloha č. 4	Trendy z pochůzkového off-line měření
Příloha č. 5	Trendy z on-line monitorování
Příloha č. 6	Spektra z on-line monitorování